



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Išmanaus energijos – eksergijos skaitiklio, dinaminio
matavimo diapazono išplėtimo galimybių tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Rokas Stankus

Projekto autorius

Prof. Dr. Dangirutis Navikas

Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Išmanaus energijos – eksergijos skaitiklio, dinaminio matavimo diapazono išplėtimo galimybių tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektronikos inžinerija (6211EX012)

Rokas Stankus

Projekto autorius

Prof. Dr. Dangirutis Navikas

Vadovas

Doc. Dr. Darijus Pagodinas

Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Rokas Stankus

Išmanaus energijos – eksergijos skaitiklio, dinaminio matavimo diapazono išplėtimo galimybių tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Roko Stankaus, baigiamasis projektas tema „Išmanaus energijos – eksergijos skaitiklio, dinaminio matavimo diapazono išplėtimo galimybių 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)

Stankus, Rokas. Išmanaus energijos – eksergijos skaitiklio, dinaminio matavimo diapazono išplėtimo galimybių tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Prof. dr. Dangirutis Navikas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: Skaitiklis, energija, eksergija, nulio dreifas, dinaminis matavimų diapazonas.

Kaunas 2019. 40 p.

Santrauka

„Išmanaus energijos – eksergijos skaitiklio, dinaminio matavimo diapazono išplėtimo galimybių tyrimas“ yra magistro baigiamasis projektas, kuriame analizuojamos energijos – eksergijos skaitiklio dinaminio matavimų diapazono praplėtimo galimybės.

Nagrinėjami trys pasirinkti metodai galintys praplėsti matavimų diapazoną: schemotechnika, algoritmai, keitikliai, matavimo ruožo geometrija. Šie metodai nagrinėjami tiek teoriškai, tiek eksperimentiškai taip pat modeliuojant. Darbe plačiai kalbama apie nulio dreifą bei jo įtaką dinaminiam matavimų diapazonui.

Šio tyrimo tikslas yra ištirti išmanaus energijos – eksergijos skaitiklio, dinaminio matavimo diapazono išplėtimo metodus ir pasiūlyti tinkamiausią sprendimą.

Tikslui pasiekti buvo iškelti uždaviniai:

1. apžvelgti literatūros šaltinius susijusius su dinaminio matavimų diapazono praplėtimo galimybėmis;
2. atlikti energijos – eksergijos skaitiklio dinaminio matavimų diapazono praplėtimo analizę;
3. sumodeliuoti arba eksperimentiniu metodu ištirti veiksnius lemiančius nulio dreifą;
4. atlikti eksperimentinius pasiūlytų metodų tyrimus.

Gauti rezultatai leidžia sumažinti nulio dreifą bei išplėsti matavimų diapazoną sumažinant skaitiklio matavimų paklaidas esant itin mažiems srautams. Papildomai pasiūlytas darbe nenagrinėtas metodas tolimesniems nulio dreifo sumažinimo tyrimams.

Stankus, Rokas. A Research of the Extension of Dynamic Measurement Range in a Smart Energy-Exergy Meter. Master's Final Degree Project / supervisor Prof. Dr. Dangirutis Navikas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: metering, energy, exergy, zero flow, dynamic range extension.

Kaunas, 2019. 40 p.

Summary

“A Research of the Extension of Dynamic Measurement Range in a Smart Energy-Exergy Meter” is a Master`s thesis that analyses extension of dynamic measurement range in energy-exergy meter.

Three methods for increasing the range of measurements are analysed: schematics, algorithms, transducers, geometry of the measurement section. These methods are analysed both theoretically and experimentally as well as by modelling. The thesis discusses zero drift and its influence on the dynamic range of measurements.

The aim of the thesis is to investigate the methods of expanding the dynamic measurement range in smart energy - exertion meter and offer the most appropriate solution.

The following objectives were raised to achieve the aim:

1. review theoretical material related to the possibilities of expanding the range of dynamic measurements;
2. analyse the expansion of the dynamic measurement range of the energy-exergy meter;
3. model or investigate the factors determining zero drift by experimental method;
4. conduct experimental research on proposed methods.

The results of the research allow to reduce the zero drift and extend the range of measurements by reducing the meter errors in extremely low flow. In addition, a non-investigated method for further research on zero drift reduce was proposed.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Įvadas.....	9
1. Dinaminio matavimų diapazono praplėtimo galimybių analizė	10
1.1. Dinaminio matavimų diapazono praplėtimo galimybių teorinis pagrindas	10
1.1.1. Schemotechnika.....	13
1.1.2. Algoritmai.....	14
1.1.3. Ultragarsiniai keitikliai.....	15
1.1.4. Matavimo ruožo geometrija	16
2. Metodikos parinkimas ir analizė.....	19
2.1. Ultragarsinių keitiklių artimos darbo zonos įtakos analizė ir tyrimas	19
2.2. Signalų sklaidimo laiko matavimo „nulinio dreifo“ tyrimas.....	27
2.3. Keitiklių žadinimo ir signalo aptikimo bei apdorojimo algoritmai	32
2.4. Pastebėjimai.....	36
Išvados	38
Literatūros sąrašas	39

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Paklaidos priklausomybė nuo triukšmo lygio.....	26
2 lentelė. Komponentų tolerancijų ir parazitinių komponentų įtaka prieš pakeitimus.....	29
3 lentelė. Komponentų tolerancijų ir parazitinių komponentų įtaka po pakeitimų.....	30

Paveikslų sąrašas

1 pav. Energijos apskaitymo schema [3]	10
2 pav. Energijos-eksergijos skaitiklio sandara lemianti dinaminį matavimų diapazoną.....	12
3 pav. Energijos-eksergijos skaitiklio sandara lemianti dinaminį matavimų diapazoną.....	13
4 pav. Srauto matavimo seka.....	14
5 pav. Ultragarso bangų siuntimas ir priėmimas [14]	14
6 pav. GP22 liko matavimo mikroschemos veikimo principas [14]	15
7 pav. Standartinis ultragarsinis keitiklis.....	16
8 pav. Dažniausios ultragarsinio signalo sklidimo trajektorijos konfigūracijos naudojant signalo sklidimo laiko matavimo metodą [8].....	17
9 pav. Matavimo neapibrėžties optimizavimas didinant slėgio nuostolius srauto matavimo kanale. Specialus srauto matavimo kanalas (a) padidina srauto greitį su minimaliais slėgio nuostoliais [5], ir ekonomiškai optimizuotas sprendimas (b) [6]	18
10 pav. Srauto įtekėjimo į matavimo ruožą keliai 90° , 45° ir 0° kampais [9].....	18
11 pav. Modeliuojama sistema	20
12 pav. Ultragarso signalo sklidimas matavimo ruože.....	20
13 pav. Sistemos su grioveliais modelis.....	21
14 pav. Ultragarso signalo sklidimas matavimo ruože su stačiakampiais grioveliais.....	22
15 pav. Ultragarso signalo sklidimas matavimo ruože su trikampiais grioveliais	22
16 pav. X_0 ir d_0 matmenų tyrimo schema.....	23
17 pav. Rezultatai pakeitus matmenis $x_0 = 3,6$ mm, $d_0 = 6$ mm.....	23
18 pav. Rezultatai pakeitus matmenis $x_0 = 10,7$ mm, $d_0 = 9$ mm.....	24
19 pav. Rezultatai pakeitus matmenis $x_0 = 7$ mm, $d_0 = 11.5$ mm.....	25
20 pav. Triukšmo signalo (Lambo bangos) įtaka pradiniam signalui	25
21 pav. Nulio dreifas po drėgmės bandymo	27
22 pav. Elektrinė matavimo grandinė.....	28
23 pav. Apskaičiuota talpos priklausomybė nuo drėgmės	28
24 pav. Apskaičiuota talpos priklausomybė nuo drėgmės	29
25 pav. SMP takeliai prieš (kairėje) ir po pakeitimų (dešinėje)	30
26 pav. Drėgmės bei temperatūros poveikis surinktai spausdintinio montažo plokštei (SMP)	31
27 pav. Po drėgmės bandymo kompensavus nulio dreifą prie 6 l/h.....	31
28 pav. Priimamo signalo imtuvo komparatoriaus grandinė.....	32
29 pav. Priimamo signalo sklidimo laiko matavimas.....	33
30 pav. Maitinimo įtampos svyravimai periodinio matavimo metu.....	33
31 pav. Supaprastinta maitinimo grandinės schema.....	34
32 pav. Maitinimo įtampos svyravimus kompensuojanti tup ir tdw matavimų išdėstymo schema (kompensuojasi skaičiuojant dviejų gretimų Δt_1 ir Δt_2 matavimų vidurkį).....	35
33 pav. Matavimo sekos ir rezultatų apdorojimo algoritmas	35
34 pav. Nulio dreifas po pakeitimų.	36
35 pav. Šiluminė konvekcija	37

Įvadas

Įmonės, gaminančios energijos bei vandens apskaitos prietaisus, siekia aukščiausios kokybės gaminant produktus, kurie tenkina klientų lūkesčius kokybės ir kainos atžvilgiu. Visa tai grindžiama ne tik rinkodaros strategijomis ir vadybiniais sugebėjimais parduoti, bet ir gaminio specifikacijomis, jo parametrais, bei funkcionalumu.

Sėkmingų įmonių prioritetuose šalia produktų kokybės svarbią vietą užima darnaus verslo idėjos. Pasaulyje vis daugiau dėmesio skiriama aplinkos apsaugai, darniam vystymuisi bei atsakingam vartojimui. Todėl gamintojai siekia riboti ir mažinti kenksmingų dujų, išskiriamų į atmosferą, kiekį. Energijos apskaitos prietaisų gamintojai kaip vieną iš sprendimų tausoti energiją įvardija tikslesnį jos apskaitymą. Dėl šios priežasties atliekami reikalingi energijos skaitiklių tobulinimai susiję su dinaminio matavimų diapazono išplėtimu. Šie pakeitimai leistų kuo tiksliau ir su kuo mažesne paklaida išmatuoti ir apskaityti vandens – šilumos srautus.

Dinaminio matavimų diapazono praplėtimas leidžia išmatuoti šiluminę energiją didesniame diapazone. Dėl šios priežasties galima fiksuoti tiek itin mažus energijos srauto pokyčius, tiek itin didelius.

Darbo tikslas: ištirti išmanaus energijos – eksergijos skaitiklio, dinaminio matavimo diapazono išplėtimo metodus ir pasiūlyti tinkamiausią sprendimą.

Uždaviniai:

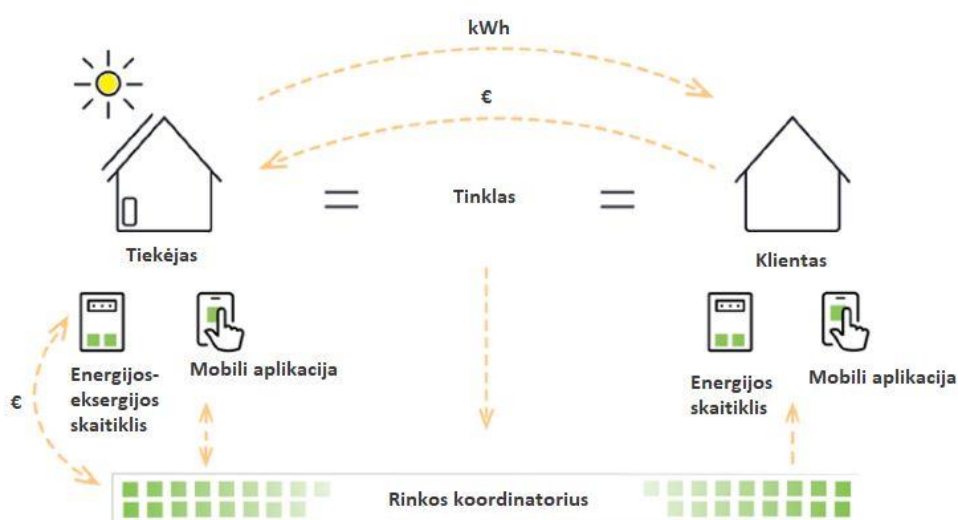
1. apžvelgti literatūros šaltinius susijusius su dinaminio matavimų diapazono praplėtimo galimybėmis;
2. atlikti energijos – eksergijos skaitiklio dinaminio matavimų diapazono praplėtimo analizę;
3. sumodeliuoti arba eksperimentiniu metodu ištirti veiksnius lemiančius nulio dreifą;
4. atlikti eksperimentinius pasiūlytų metodų tyrimus.

1. Dinaminio matavimų diapazono praplėtimo galimybių analizė

Didelis vandens ar energijos skaitiklio dinaminis matavimų diapazonas yra reikalingas platesniam vandens srauto apskaitymui, t. y. nuo itin mažų srauto apimčių iki itin didelių, todėl šiame skyriuje pateikiama dinaminio matavimų diapazono praplėtimo teorinė koncepcija.

1.1. Dinaminio matavimų diapazono praplėtimo galimybių teorinis pagrindas

Šiuo metu rinkoje populiariausi ultragarsiniai energijos – eksergijos skaitikliai. Energijos – eksergijos skaitiklis – tai energijos skaitiklis su galimybe skaičiuoti atiduodamos energijos kiekį atgal į energijos tiekimo tinklą [1, 2]. Tai reiškia, kad turint saulės kolektorių, skirtą gaminti šilumai, esamą energijos perteklių galima perduoti atgal į tinklą, bei apskaityti perduotos energijos kiekį. Tokio prietaiso įjungto į energijos tinklą iliustraciją (žiūrėti 1 pav.) pateikę verslo analitikai teigia, jog taip sudaryti išmanūs vartotojų bei tiekėjų tinklai yra siektina schema norint užtikrinti optimaliausią energijos paskirstymą, bei mažiausią jos švaistymą [3].



1 pav. Energijos apskaitymo schema [3]

Energijos – eksergijos skaitiklį sudaro energijos skaitiklis, kuriame papildomai veikia Eksergija algoritmas (žiūrėti 2 pav.). Eksergija gali būti apibūdinama kaip „sistemoje, įrenginyje gautos „naudingos“ ir tam tikslui panaudotos energijos santykis“ [6]. Paprasčiau tariant, eksergija nusako energijos kokybinę vertę [7].

Energijos skaitiklis yra prietaisas, matuojantis pratekėjusio vandens tūrį per tam tikrą laiko vienetą, bei turintis du temperatūros kanalus. Vienas iš jų matuoja į objektą (namą, ar kitą apšildomą pastatą) įtekančio karšto vandens temperatūrą, kitas – ištekančio vandens temperatūrą. Žinant $T_{\text{įtekančio}}$ ir

$T_{ištekančio}$ vandens temperatūrų skirtumą ir srautą, galima apskaičiuoti, kiek energijos, t. y. šilumos buvo atiduota[8].

$$Q = C_p \cdot M \cdot (T_t - T_g) \quad (1)$$

Q – perduota šiluminė energija [kJ],

C_p – vandens savitoji šiluma [=4.200 kJ/kgK],

M – vandens masė, arba šiuo atveju vandens srautas [l/h],

T_t – yra šilumos tinklų vartotojui tiekiamo vandens temperatūra [K],

T_g – iš vartotojo į tinklus gražinamo termofikacinio vandens temperatūra[K].

Pagrindiniai parametrai nusakantys šilumos skaitiklių veikimą yra:

- minimalus/maksimalus srautas per skaitiklį (dinaminis matavimų diapazonas);
- slėgio nuostoliai matavimo kanale;
- darbinės temperatūros diapazonas.

Tokie energijos – eksergijos skaitikliai šiuo metu vis labiau populiarėja dėl vis dažniau įrengiamų atsinaujinančios energetikos sprendimų įmonėse ar namų ūkiuose [3].

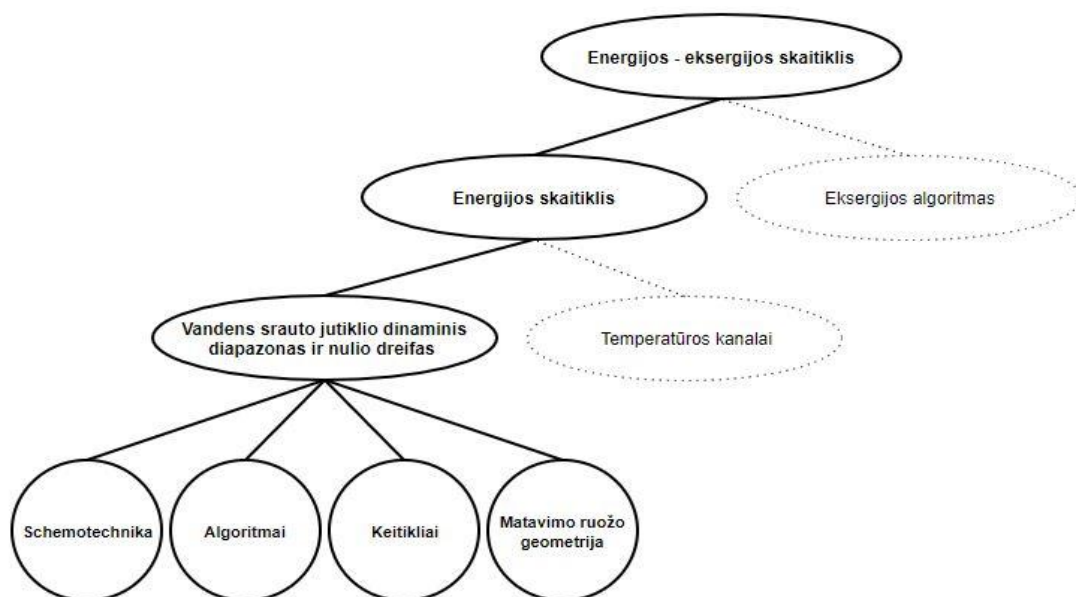
Vandens srauto jutiklyje yra parametras, kuris nusako santykį tarp didžiausio ir mažiausio matuojamo vandens srauto tekančio per matavimo ruožą, tai vadinama dinaminio matavimų diapazonu. Šis dydis dažniausiai yra nurodomas skaitiklio techninėse charakteristikose kaip dydis R , kuris yra santykis maksimalaus srauto su minimaliu srautu per matavimo ruožą (jutiklį).

$$R = \frac{q_{maksimalus}}{q_{minimalus}} \quad (2)$$

Pagrindiniai veiksniai lemiantys didelį dinaminį matavimo diapazoną yra schemotechnika, matavimo algoritmai, ultragarsiniai keitikliai bei matavimo ruožo geometrija. Visa energijos – eksergijos skaitiklio struktūra pateikta 2 paveikslėlyje.

Pagal antrąją termodinamikos dėsnį eksergija yra energijos kokybė, kuri nusako termodinaminių vyksmų kryptį. Kitaip tariant, ji gali būti panaudota norint apskaičiuoti dvipusį energijos kiekį bei jo kaitą. Todėl energijos – eksergijos skaitiklis nuo paprasto energijos skaitiklio skiriasi tik papildomu

eksergijos algoritmu, o algoritmo veikimas neturi įtakos skaitiklio dinaminiam matavimų diapazonui, todėl jo sudarymas bei veikimas nebus nagrinėjami šiame darbe.



2 pav. Energijos-eksergijos skaitiklio sandara lemianti dinaminį matavimų diapazoną

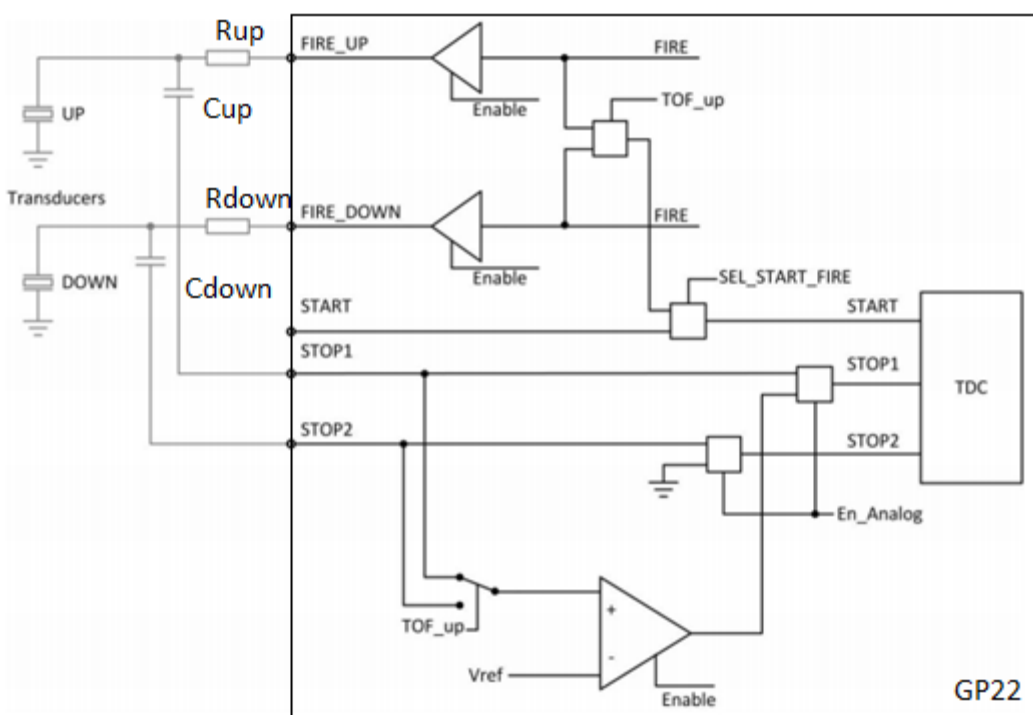
Energijos skaitiklis yra sudarytas iš dviejų tipų jutiklių: iš srauto jutiklio bei dviejų temperatūros jutiklių. Dauguma komercinių skaitiklių šiems jutikliams valdyti naudoja specializuotas mikroschemas – konverterius, kurie savo sandaroje turi tiek temperatūros, tiek srauto jutiklių nuskaitymo kanalus. Pavyzdžiui, plačiai naudojami GP serijos konverteriai yra pritaikyti populiariausiems PT500 ir PT1000 temperatūros jutikliams. Šiuose konverteriuose yra įdiegti pažangūs kompensavimo metodai leidžiantys išmatuoti temperatūrą pakankamai tiksliai kad temperatūros matavimo dalis nedarytų didelės įtakos bendram energijos skaitiklio dinaminiam matavimų diapazonui.

Šiuose konverteriuose taip pat yra ir srauto jutiklių nuskaitymo dalis. Ši dalis yra universali ir tinka įvairių tipų ultragarsiniams jutikliams ir unikalios konstrukcijos matavimo ruožams. Tai reiškia, kad prie tokio konverterio dar turi būti papildomų komponentų skirtų užtikrinti optimaliam keitiklių darbui. Taip pat konverteriuose turi veikti unikalūs skaitiklių gamintojo algoritmai. Dėl šių priežasčių šiame darbe bus tiriama schemotechnikos, algoritmų, keitiklių bei matavimo ruožo geometrijos priklausomybė dinaminiam matavimų diapazonui, bei pasiūlomos dinaminio matavimų diapazono praplėtimo galimybės.

1.1.1. Schemotechnika

Daugumos ultragarsiniams skaitikliams skirtų keitiklių techniniuose lapuose yra nurodyta, kad pjezo keitikliai gali būti prijungiami tiesiogiai prie konverterio be jokių kitų komponentų, papildomai prijungiami tik suderinimo kondensatoriai ir rezistoriai. Tačiau toks jungimas galimas tik tuomet kai matavimo ruožas bei keitikliai yra praktiškai idealūs.

Realybėje signalai matavimo ruože silpsta, todėl didesnio diametro ruožams yra reikalingas papildomas signalo stiprinimas. Stiprinimo atveju prisideda nemažai papildomų komponentų tokių kaip stiprintuvai ar transformatoriai. Tokie komponentai įneša į matavimo sistemą laikinius vėlavimus bei temperatūrinius svyravimus tokius kaip nulio dreifas.

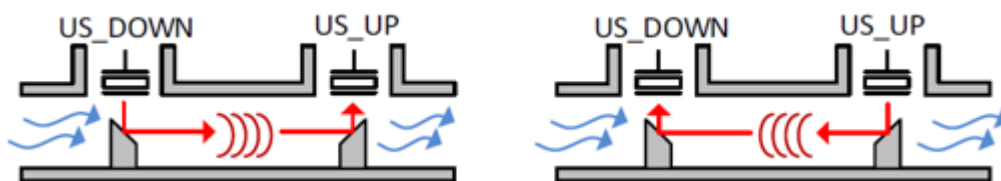


3 pav. Energijos-eksergijos skaitiklio sandara lemianti dinaminį matavimų diapazoną

Kiekvienas elektronikos komponentas patiria senėjimo požymius, kitaip tariant, keičia savo savybes bėgant laikui, kintant temperatūrai bei veikiant kitiems pašaliniams veiksniams tokiems kaip vibracijos [13]. Tad kuo daugiau komponentų yra sistemoje, tuo didesnė tikimybė visai sistemai pakeisti savo pradinius parametrus bei nebeatitikti reikalavimų.

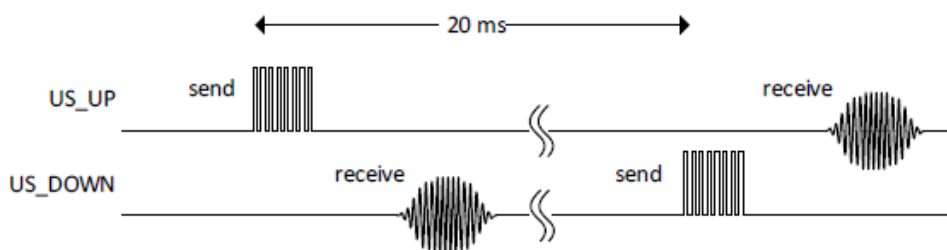
1.1.2. Algoritmai

Ultragarsinis keitiklis paleidžia ultragarso spindulį, kuris keliauja matavimo kanalu atsispindėdamas nuo ultragarsinių veidrodžių arba matavimo ruožo sienelių. Tokiu būdu šis spindulys yra aptinkamas kito ultragarsinio keitiklio. Pirmiausia, tai atliekama viena srauto kryptimi (pagal srautą arba prieš srautą), o aptikus signalą ir apskaičiavus sklaidimo laiką, atgaline kryptimi išsiunčiamas impulsas iš keitiklio, kuris gavo signalą. Taip gaunami sklaidimo laikai prieš srautą ir pagal srautą. Žinant šiuos laikus bei matavimo ruožo skerspjūvį galima apskaičiuoti skysčio tekėjimo srautą (žiūrėti 4 pav.).



4 pav. Srauto matavimo seka

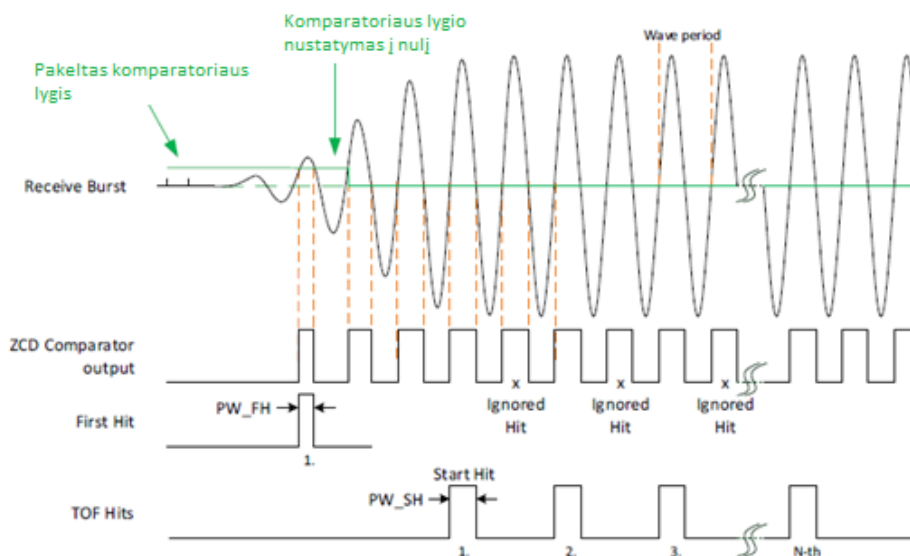
Dažniausiai periodiniai matavimo prietaisai kuriami taip, kad jų matavimo periodas sutaptų su aplinkoje vyraujančiais periodiniais trikdžiais. Šiuo atveju kiekvienas matavimas yra vykdomas kas 20 ms. dėl tinklo įtampos 50 Hz dedamosios pašalinimo (žiūrėti 5 pav.).



5 pav. Ultragarso bangų siuntimas ir priėmimas [14]

Vandens bei energijos srauto skaitikliuose dažniausiai naudojamos specializuotos srauto arba srauto ir temperatūros matavimo mikroschemos. Jose integruotas itin tikslus laiko matavimo mechanizmas, gebantis pikosekundžių skyra matuoti sklaidimo laiką. Tokios mikroschemos keitikliui išsiunčia keliolikos impulsų seką bei kitu kanalu registruoja gautą signalą. Kadangi detektuotos impulsų sekos pradžia būna susilpnėjusi ir gaunama su triukšmu, todėl pirmajam impulsui detektuoti yra specialiai nustatomas aukštesnis komparatoriaus lygis, taip kad būtų lygus dviem trečdaliams pirmojo impulso

amplitudės. Kirtus komparatoriaus lygį yra pažadinama matavimo mikroschema bei tiksliai išmatuojami sekantys impulsų laikai (žiūrėti 6 pav.) [14].



6 pav. GP22 liko matavimo mikroschemos veikimo principas [14]

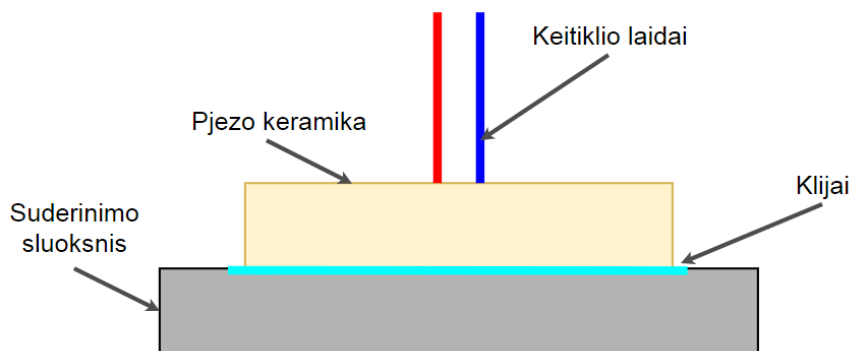
Po to kai yra aptinkamos pirmosios gauto signalo bangelės, komparatoriaus lygis yra nuleidžiamas į nulį. Taip yra užtikrinamas signalo kirtimas per nulio ašį. Jei signalas nebūtų nuleidžiamas, atsirastų nuolatinė laiko dedamoji kuri pridėtų papildomas paklaidas gautame sklidimo laike.

1.1.3. Ultragarsiniai keitikliai

Ultragarsas – tai garsas, kurio dažnis yra didesnis už žmogaus ausies juntamo diapazono dažnį, t. y. didesnis nei 20000 Hz. Ultragarso panaudojimas elektronikoje bei medicinoje yra plačiai paplitęs. Tai sąlyginai pigi ir suteikianti daug informacijos apie matuojamą medžiagą matavimo forma. Todėl nenuostabu, kad ši technologija yra sėkmingai naudojama tiek pramonėje, tiek buityje. Būtent tokiu principu veikiantys vandens – šilumos skaitikliai yra populiariausi tarp vandens apskaitos prietaisų, nes jie:

- neturi besidėvinčių dalių todėl yra ilgaamžiai;
- atsparūs pridėtam magnetiniam laukui;
- tikslūs;
- gali turėti didelį matavimų diapazoną;
- vartoja mažai energijos.

Norint išgauti kuo didesnę dinaminę matavimų diapazoną ultragarsiniame energijos skaitiklyje, reikia turėti kuo didesnę amplitudę, bei kuo švaresnį signalą. Už elektrinio signalo konvertavimą į ultragarsinį atsakingas ultragarsinis keitiklis, kuris sudarytas iš pjezo keramikos bei prie jos pritvirtintos medžiagos, kuri sulygina medžiagų akustines varžas. Ši medžiaga dažniausiai yra polimeras, kuris pasižymi akustinėmis savybėmis, panašiomis į vandens akustines savybes. Tokia medžiaga dažniausiai prikljuojama specialiais kljais prie pjezo keramikos plokštelės, o visas keitiklis įdedamas į specialiai jam pritaikytą korpusą.



7 pav. Standartinis ultragarsinis keitiklis

Kadangi keitikliai gaminami juos suklijuojant, yra labai sunku užtikrinti vienodą kljū sluoksnį tarp keramikos ir suderinimo sluoksnio. Tokiu principu gaminami keitikliai niekada nebūna vienodi. Naudojant skirtingų akustinių parametrų keitiklius kartu, neįmanoma užtikrinti kokybiško signalo. Todėl vienas iš variantų gerinant keitiklių kokybę, yra juos poruoti. Keitikliai poruojami pagal centrinę rezonansinę dažnį taip užtikrinami minimalūs signalo nuostoliai, juos detektuojant.

1.1.4. Matavimo ruožo geometrija

Projektuojant energijos srauto skaitiklį yra svarbu tinkamai suprojektuoti skaitiklio konstrukciją. Galima išskirti keletą energijos srauto skaitiklių konstrukcijų optimizacijos strategijų.

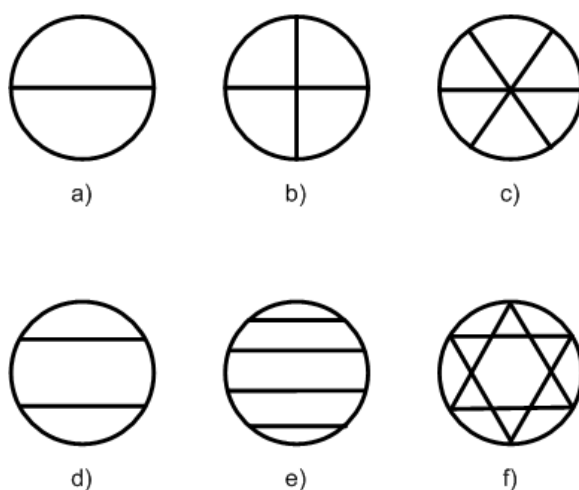
Pirmoji strategija teigia, kad energijos srauto skaitiklio tikslumą galima pagerinti net ir tada, kai srauto profilis nėra stabilus arba nežinant daugėja ultragarsinio signalo sklaidimo kelių skaičius, ar naudojamas išlenktas sklaidimo kelias^[3]. Siekiant pagerinti skaitiklio našumą nustatant greičio profilius, optimizuojami sklaidimo kelio svertiniai koeficientai. Dažniausios ultragarsinio signalo sklaidimo trajektorijos konfigūracijos naudojant signalo sklaidimo laiko matavimo metodą parodytos 8 paveikslėlyje. Naudojant tik vieną ultragarsinio skaitiklio signalo sklaidimo kelią, galima pasiekti apie

10% matavimo neapibrėžtį, o naudodami 18 ultragarso sklidimo kelių matavimo neapibrėžti galima sumažinti iki 0,2% [6].

Kita strategija yra optimizuoti matavimo kanalo konfigūraciją naudojant srauto profilio lygintuvus arba keičiant ir stabilizuojant srauto tekėjimo profilį [5]. Srauto profilis keičiamas į turbulentinį srautą didinant slėgio nuostolius matavimo kanale [6]. Tai turi du privalumus:

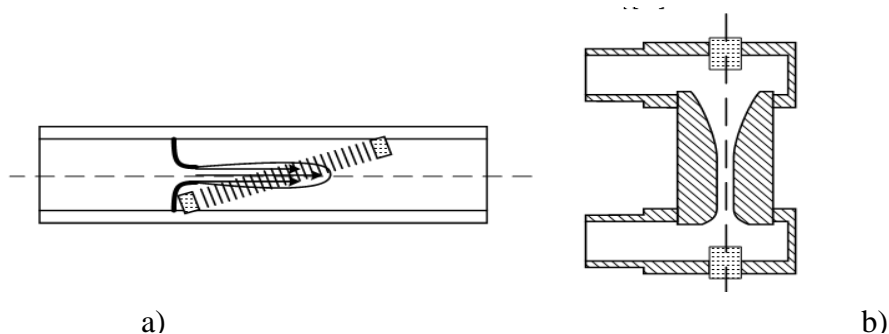
- pereinamas srauto tekėjimo režimas perkeliamas į mažesnius srautus;
- srauto profilis yra mažiau priklausomas nuo įtekančio srauto profilio.

Trečioji optimizacijos strategija yra paremta sudėtingu ultragarsinio signalo sklidimu matavimo kanale. Šiuo atveju tikslas yra pasiekti, kad ultragarsinio signalo sklidimo kelio vieta būtų kuo įmanoma arčiau turbulentinio ir laminarinio srauto profilio susikirtimo vietos. Tai sumažina įtaką, keičiantis srauto tekėjimo profiliui, matavimo tikslumui ir leidžia išplėsti prietaiso dinaminio diapazono ribą [6].



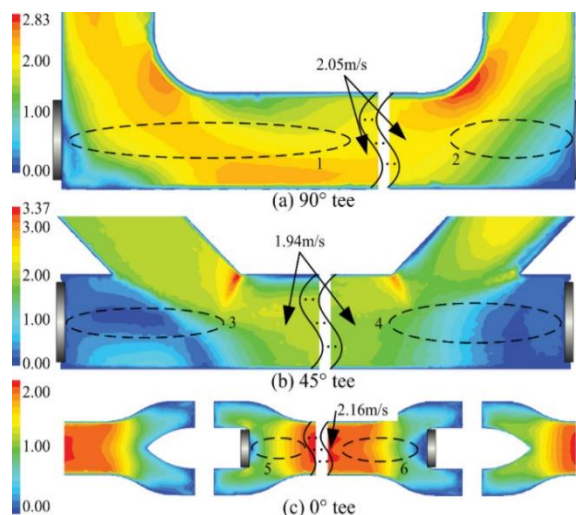
8 pav. Dažniausios ultragarsinio signalo sklidimo trajektorijos konfigūracijos naudojant signalo sklidimo laiko matavimo metodą [8]

Aprašyti tyrimai apie skysčių bei dujų srautų matavimus mažo diametro ruožuose, modeliuojamas bei eksperimentiškai tiriamas skysčio įtekėjimo į ruožą kampas. Nuo įtekėjimo kampo priklauso srauto tolygumas matavimo kanale bei srauto greitis.



9 pav. Matavimo neapibrėžties optimizavimas didinant slėgio nuostolius srauto matavimo kanale. Specialus srauto matavimo kanalas (a) padidina srauto greitį su minimaliais slėgio nuostoliais [5], ir ekonomiškai optimizuotas sprendimas (b) [6]

Sumodeliuoti trys dažniausiai naudojami srauto įtekėjimo į matavimo ruožą kampai, tai 90° , 45° ir 0° . Pastebėta, kad 90° kampu įtekantis skystis matavimo kanale yra nepastovaus greičio bei turi netolygų tekėjimo kelią, todėl keičiantis debitams gali atsirasti sūkuriai ir taip iškraipyti matavimus. Taip pat sumodeliuoti 45° ir 0° matavimo ruožai, kurie parodė daug geresnius rezultatus, srauto greitis tokiuose matavimo kanaluose buvo pastovesnis, aiškaus tekėjimo profilio, kas leistų tiksliau sukalibruoti matavimus, bei sumažinti nulio dreifą.



10 pav. Srauto įtekėjimo į matavimo ruožą keliai 90° , 45° ir 0° kampais [9]

Autoriai pateikia išvadą, kad tokios konstrukcijos matavimo ruožas gali tiksliai susikalibruoti bei turėti mažą nulio dreifą. Paklaida neviršija 0,1% nuo 15 iki 150 g/s (nuo 0.29 iki 2.99 m/s). Tai yra labai svarbu stengiantis praplėsti dinaminį matavimų diapazoną [9].

2. Metodikos parinkimas ir analizė

Šiame darbe pasirinkta plačiau tyrinėti ultragarsinių keitiklių bei matavimo ruožo geometrijos parametrus, skaitiklio spausdintinės montažo plokštės bei nulio dreifo priklausomybes bei matavimo algoritmus ir galimybes optimizuoti nulio dreifą pakeičiant matavimo algoritmą.

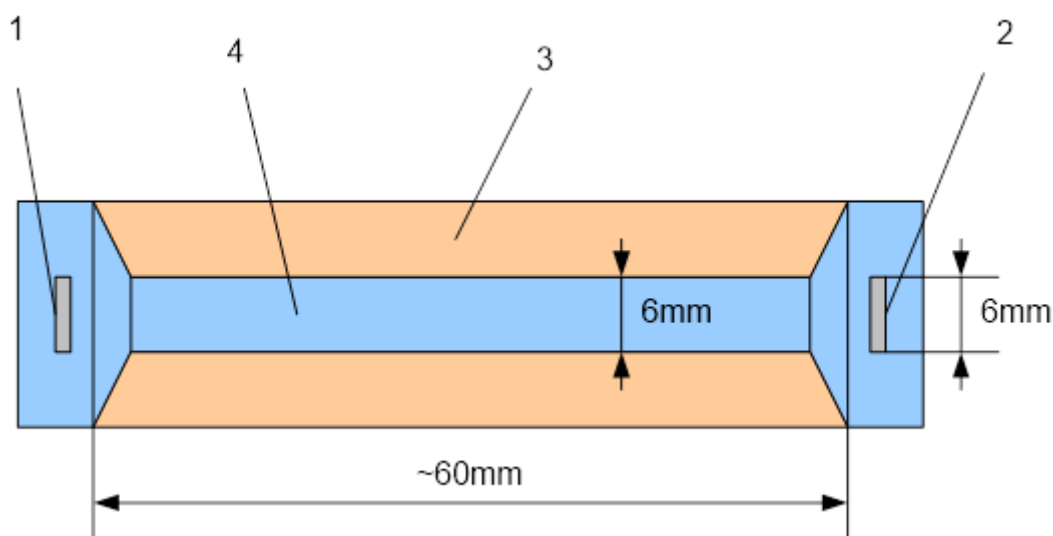
2.1. Ultragarsinių keitiklių artimos darbo zonos įtakos analizė ir tyrimas

Domintis matavimų kanalais bei ultragarso signalo sklidimu juose buvo nutarta detaliau išanalizuoti ultragarso sklidimą matavimo ruože. Srauto jutikliai yra dažniausiai gaminami iš žalvario. Žalvaris yra santykinai pigi ir gerai apdirbama medžiaga, kas leidžia sukurti unikalios formos bei norimų parametrų srauto jutiklį.

Projektuojant matavimo kanalus labai svarbu nuspėti signalo sklidimo ypatybes. Laboratorijose gali būti atliekami slėgio nuostolių bandymai, mechaninio atsparumo bandymai ir t.t. Tačiau laboratorijoje neįmanoma pamatyti kaip gi iš tikrųjų matavimo kanalu sklinda ultragarso banga. Šių procesų pažinimui buvo panaudota programa **Wave2000**. Ji skirta modeliuoti ultragarso spindulio sklidimą įvairiuose terpėse. Modeliavimo tikslas buvo išsiaiškinti kaip sklinda pagrindinis signalas ir kokie susidaro šautiniai ultragarso signalai sklindantys ta pačia trajektorija kaip ir pagrindinis signalas. Šalutiniai signalai patekę į imtuvą iškraipo matavimo rezultatus ir mažina prietaiso dinaminį diapazoną.

Šiame skyriuje pateiktas ultragarso signalo sklidimas mažo diametro kanalais, pagamintais iš žalvario su skirtingos konfigūracijos kanalais.

Pirma modeliuojama sistema:



11 pav. Modeliuojama sistema

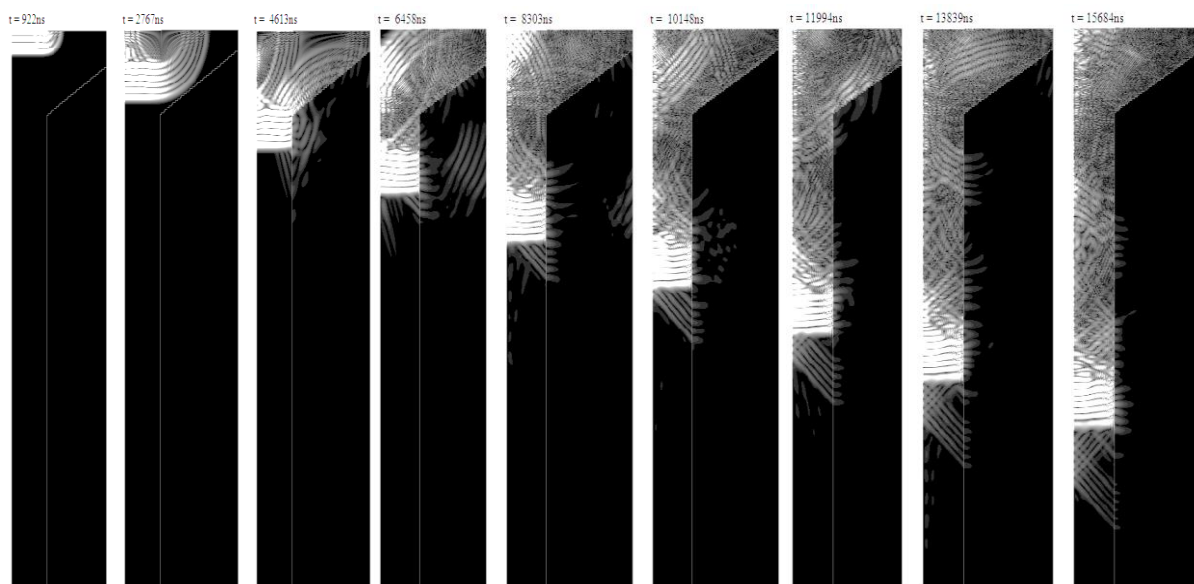
1,2 – ultragarsiniai keitikliai

3 – žalvarinis ruožas

4 - vanduo

Žadinimo signalui naudojamas 3 periodų 2MHz signalas.

Modeliavimo rezultatai:



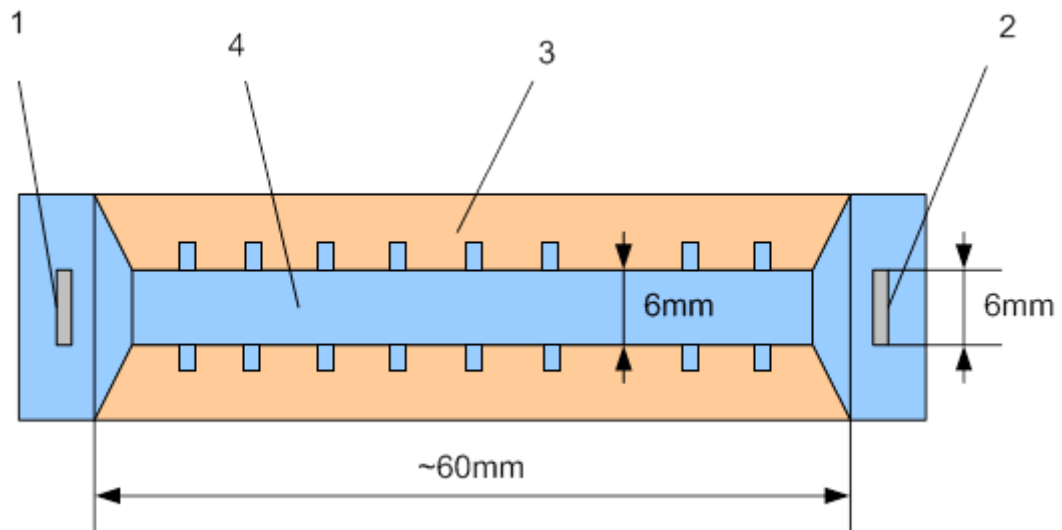
12 pav. Ultragarso signalo sklidimas matavimo ruože

Rezultatai rodo, kad ultragarsas sklisdamas vandeniui matavimo ruožo sienelėje sukuria Lembo bangas, kurios sienelės medžiagoje sklisdamos greičiau sukuria šalutinį signalą, kuris imtuvą pasiekia

greičiau nei pagrindinis signalas [15, 16]. Vykstant tokiam reiškiniiui yra gaunama daug triukšmo prieš naudingą signalą, kuris trukdo tiksliai aptikti tikrąją signalo pradžią [23].

Siekiant sumažinti Lembo bangų sklidimą, matavimo kanalo kelyje buvo įvesti stačiakampiai ir trikampiai grioveliai. Rezultatai parodo, jog abu paviršiaus apdirbimo būdai ženkliai sumažino nepagrindinio signalo amplitudę.

Antra modeliuojama sistema:



13 pav. Sistemos su grioveliais modelis

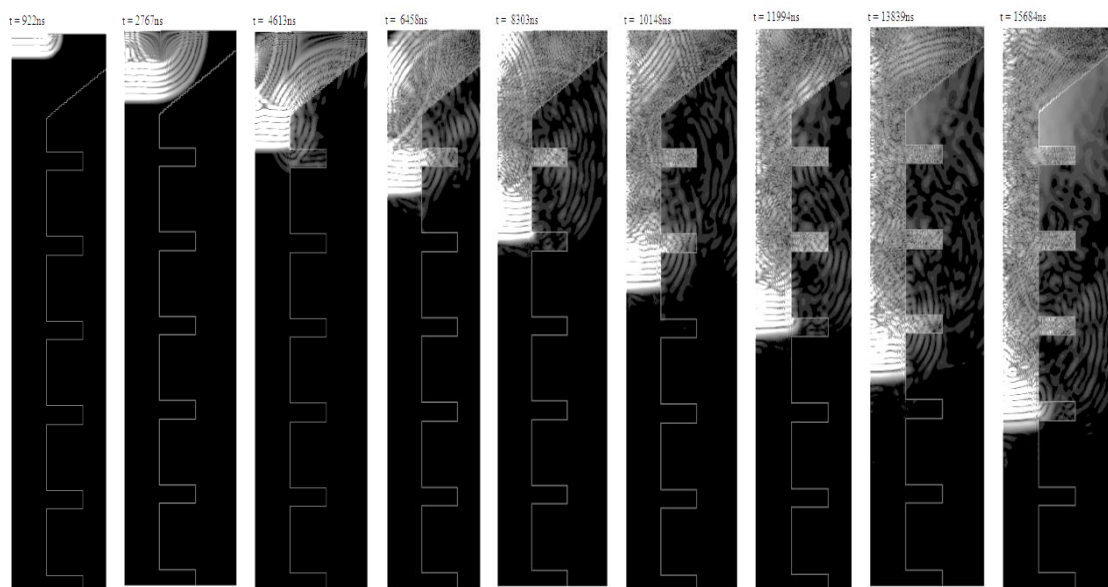
1,2 – ultragarsiniai keitikliai

3 – žalvaris

4 - vanduo

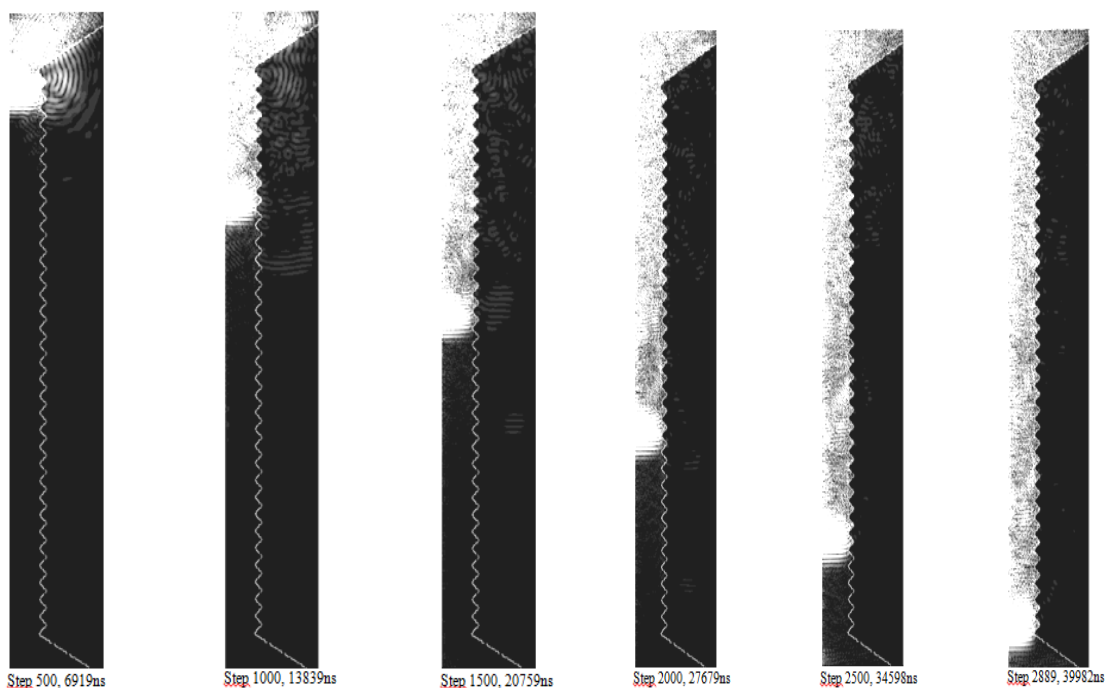
Žadinimo signalui naudojamas 3 periodų 2MHz signalas.

Modeliavimo rezultatai su stačiakampiais grioveliais:



14 pav. Ultragarso signalo sklidimas matavimo ruože su stačiakampiais grioveliais

Modeliavimo rezultatai su trikampaiais grioveliais:

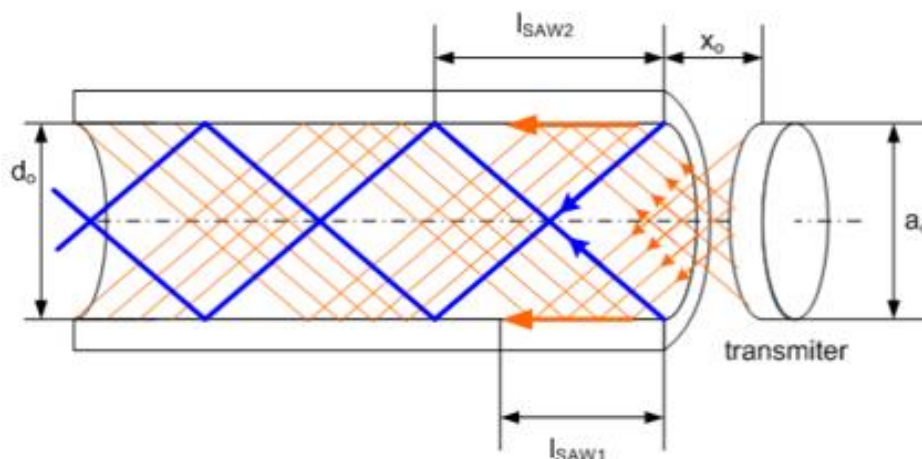


15 pav. Ultragarso signalo sklidimas matavimo ruože su trikampaiais grioveliais

Detaliau analizuojant modeliavimo rezultatus atkreiptas dėmesys, kad Lembo bangos susidaro tik signalui patenkant į sienelę tam tikru (kritiniu) kampu. O antrinė banga taip pat išspinduliuojama tuo pačiu kampu ir sklinda zigzagais. Problema yra, kad sienelė sklisdama Lembo banga (oranžinė linija

sienelės paviršiuje) sklinda greičiau nei vandenyje, dėl to antrinis signalas turi galimybę sklisti artimu pagrindiniam signalui greičiu.

Į tai buvo atkreiptas dėmesys ir siunčiantis keitiklis buvo pastatytas tokiu X_0 atstumu nuo kanalo pradžios, kad keitiklio artimos zonos siunčiamas signalas negalėtų patekti į kanalo sienelę kritiniu kampu. Atlikti trijų modifikuotų konstrukcijų skaičiavimai ir modeliavimai.



16 pav. X_0 ir d_0 matmenų tyrimo schema

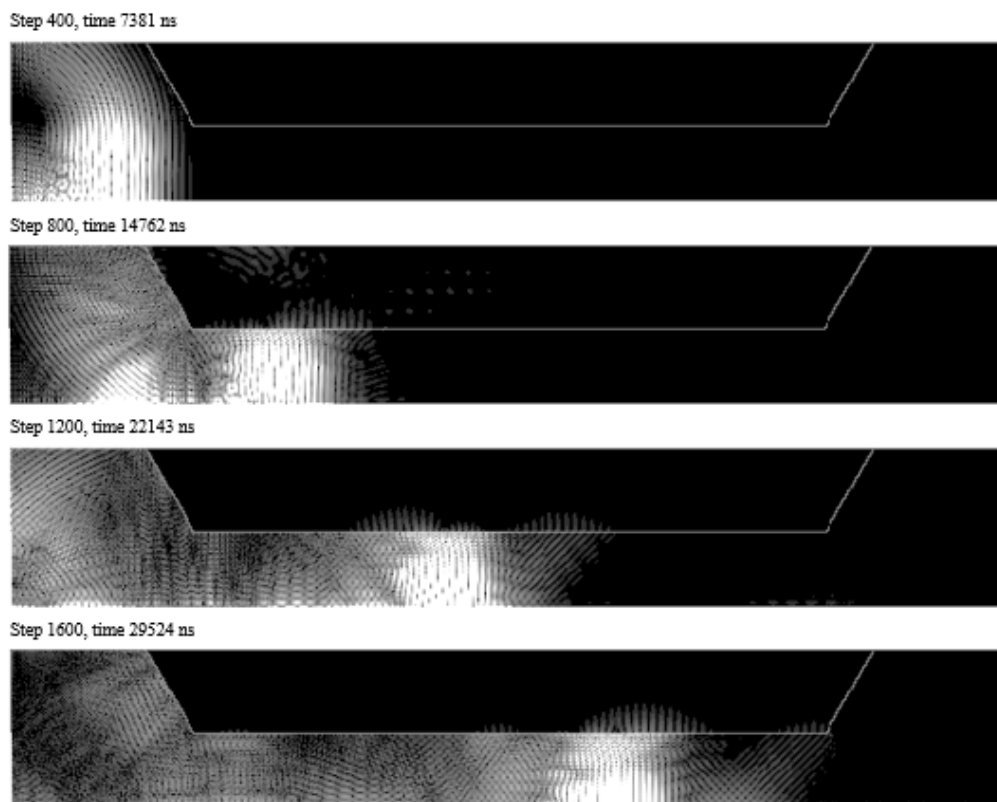
Tarpas tarp keitiklio ir susiaurėjimo $x_0 = 3,6$ mm, $d_0 = 6$ mm.



17 pav. Rezultatai pakeitus matmenis $x_0 = 3,6$ mm, $d_0 = 6$ mm.

Rezultatuose matomas labai didelis signalo triukšmas bei per sienelės sklindančios Lembo bangos, taip yra dėl pakankamai didelio bangų sklidimo kampo į ruožo sienelę. Sekančiu bandymu x_0 atstumas padidinamas iki 10,7 mm ir d_0 iki 9 mm.

Tarpas tarp keitiklio ir susiaurėjimo $x_0 = 10,7$ mm, $d_0 = 9$ mm.

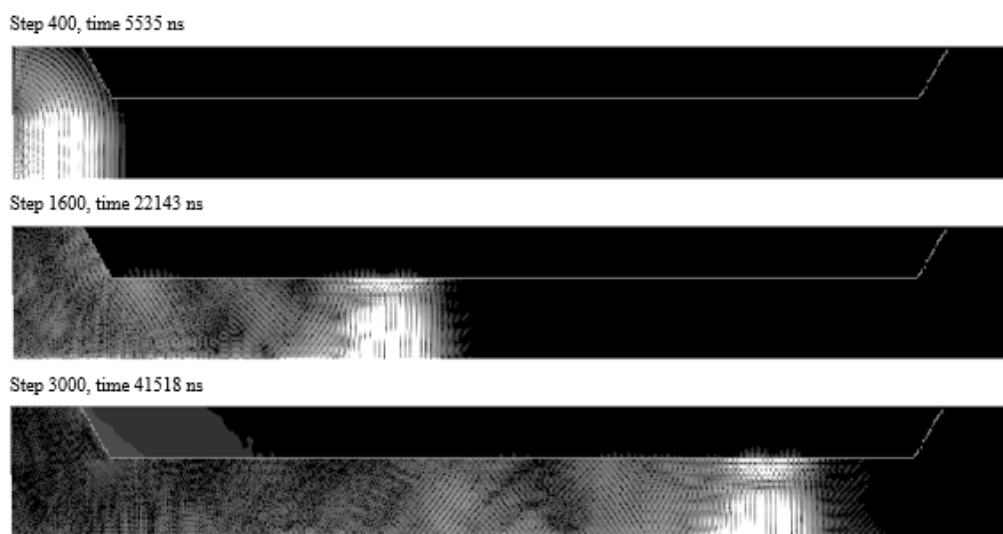


18 pav. Rezultatai pakeitus matmenis $x_0 = 10,7$ mm, $d_0 = 9$ mm

Modeliavimo rezultatai rodo jog rezultatas yra šiek tiek geresnis tačiau vis vien yra matomos atsispindėjusios bangos kurios prieš pagrindinį signalą sukelia triukšmą.

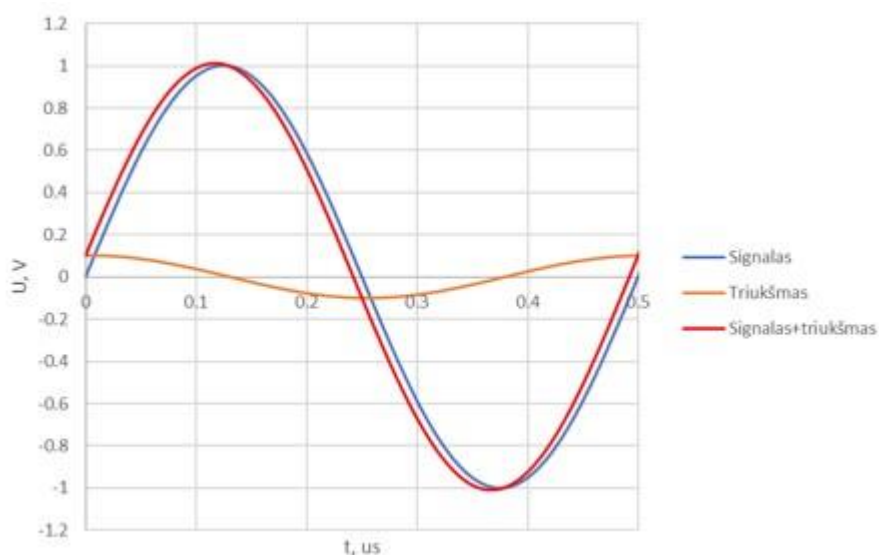
Sekančiu bandymu x_0 atstumas sumažinamas iki 7 mm., bet padidinamas d_0 iki 11,5mm.

Tarpas tarp keitiklio ir susiaurėjimo $x_0 = 7$ mm, $d_0 = 11.5$ mm.



19 pav. Rezultatai pakeitus matmenis $x_0 = 7$ mm, $d_0 = 11.5$ mm

Modeliavimo rezultatai rodo, kad norint sumažinti ultragarso bangų atspindėjimą nuo ruožo sienelių, reikia padidinti atstumą tarp ruožo susiaurėjimo ir keitiklių, padidinti susiaurėjimo diametrą arba pakeisti paviršiaus apdirbimą. Projektuojant bei kuriant ultragarasinį srauto jutiklį reikia atsižvelgti ar banga nesklinda sienelės link kritiniu kampu. Jei ultragarso bango ilgis yra artimas kanalo sienelės matmenims, yra tikimybė susidaryti Lembo bangai. Bangų difrakcijos principu susidariusi Lembo banga gali būti prisumuota prie pagrindinės bangos, bei pakeisti jos fazę, kas gali lemti didelę matavimų paklaidą esant mažam srautui per matavimo kanalą.



20 pav. Triukšmo signalo (Lambo bangos) įtaka pradiniam signalui

Modeliavimo rezultatai bei skaičiavimai (20 pav.) rodo, jog prieš pagrindinį ultragarso signalą sklindanti triukšmo (Lambo) banga gali susidėti su pagrindiniu signalu taip sudarydama jau

pakitusios fazės signalą. Priimant blogiausią atvejį – kai triukšmo signalas ir tikrasis signalas persidengia per 90^0 gaunama maksimali paklaida bei yra iškreipiamas galutinis signalas lyginant su pradiniu (žiūrėti 20 pav.). Paskaičiuota galimai susidaranti matavimo paklaida, kuri gali susidaryti tekant minimaliam srautui (1 ns sklidimo laiko skirtumas) per skaitiklį.

1 lentelė. Paklaidos priklausomybė nuo triukšmo lygio

Triukšmo santykis	Δt santykis, ns	Paklaida prie 1 ns, %
1/10	-8	800
1/100	-0.8	80
1/1000	-0.08	8

Skaičiavimai rodo, jog prie 10 kartų mažesnio triukšmo signalo gali susidaryti labai didelė apie 800% paklaida, tačiau tokia paklaida, bei toks signalo nukrypimas dar yra nesunkiai pastebimas bei ištaisomas. O esant 1000 kartų mažesniai triukšmo signalui jį pastebėti darosi sudėtinga. Tačiau kaip rodo skaičiavimai, jis gali įnešti taip pat gana reikšmingą 8% paklaidą į srauto matavimą esant minimaliam srauto greičiui.

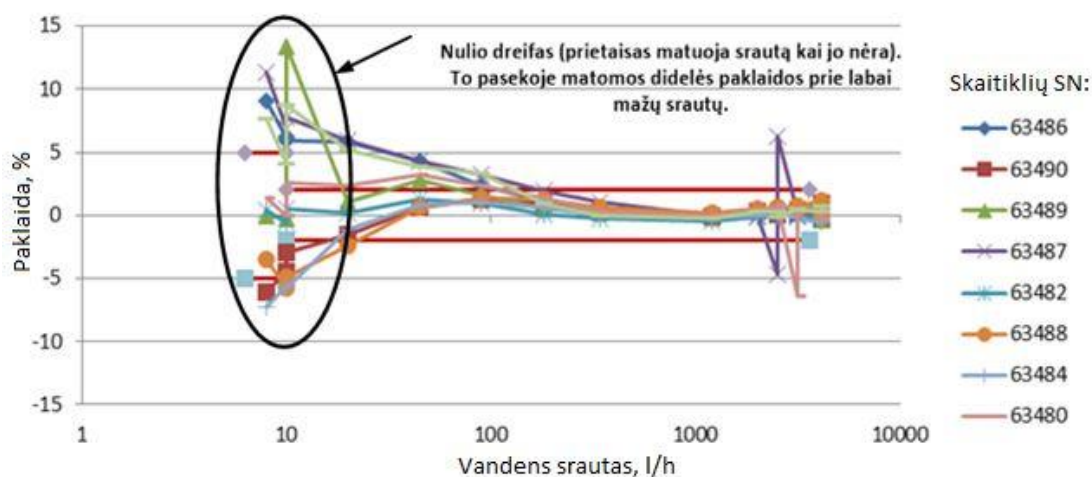
Šis reiškinys darys įtaką skaičiavimams bei įneš paklaidą tik esant minimaliems srauto greičiams kadangi didėjant srauto greičiui bus didinamas išmatuojamas ultragarso sklidimo greitis, tačiau triukšmo signalo įneštas Δt santykis liks toks pat.

Tolimesniuose tyrimuose buvo atkreiptas dėmesys į šiuos rezultatus, todėl buvo perprojektuojami matavimo ruožai, atitinkamai parenkant kanalo geometriją bei medžiagų savybes.

2.2. Signalo sklidimo laiko matavimo „nulinio dreifo“ tyrimas

Dinaminiam matavimų diapazonui taip pat daro įtaką ir toks neigiamas reiškinys, kaip nulio dreifas.

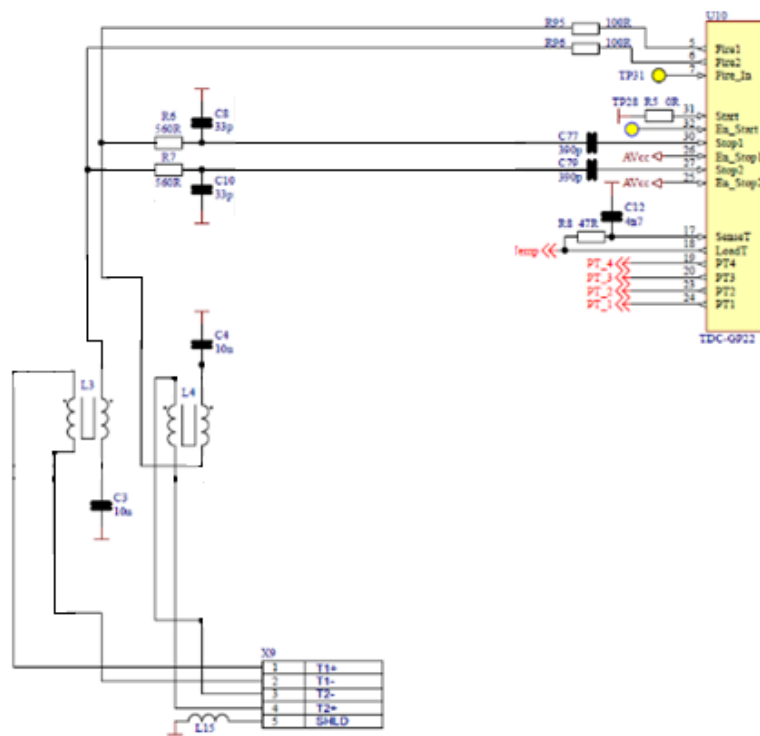
Nulio dreifo bandymams buvo pasirinkta 10 vnt. bandomųjų šilumos skaitiklių. Buvo atliktas jų pradinis tyrimas, kurio metu prietaisai buvo sukalibruoti. Po kalibravimo bei patikros buvo atliekami drėgmės tyrimai. Kalibruoti skaitikliai 168 valandas buvo patalpinti 50°C temperatūros vandenyje, 0,4 atmosferų slėgyje. Po 168 valandų vandens nepralaidumo testo, jie buvo išimti iš vandens, bei palikti 24 valandom atvėsti bei išdžiūti. Po to prietaisams buvo atliekama srauto patikra. Atlikus drėgmės testą rezultatai pasikeitė, rezultatai parodė jog 9 prietaisai išeina už maksimalių leistinų paklaidų ribų mažo srauto srityje (21 pav.), todėl buvo iškelta hipotezė, jog bandymų metu neleistinais padidėjo nulio dreifas (t.y. sklidimo laikų skirtumas kai matavimo kanale skysčio tekėjimo greitis lygus 0).



21 pav. Nulinio dreifas po drėgmės bandymo

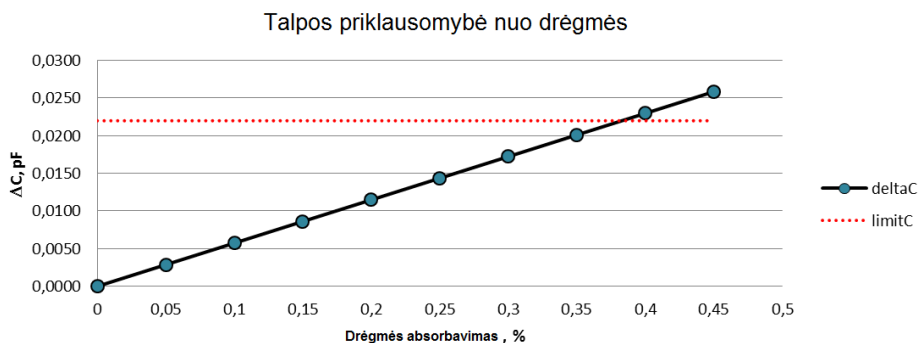
Nulio dreifas yra komponentų savybių paveiktas paklaidos kitimas, atsirandantis kintant temperatūrai ir laikui (šiuo atveju įtariamas drėgmės poveikis, kuris dažniausiai keičia medžiagų laidumą arba dielektrinę skvarbą – keičiasi parazitiniai dydžiai).

Atlikta matavimų grandinės komponentų (22 pav.) įtakos dreifui analizė. Nustatyta, jog komponento U10 išvaduose 27 ir 30 (Stop1, Stop2) atsirandančios nuotėkio srovės, bei talpumų pokyčiai labiausiai veikia rezultatus. Kitų komponentų įtaka buvo leistinose ribose.

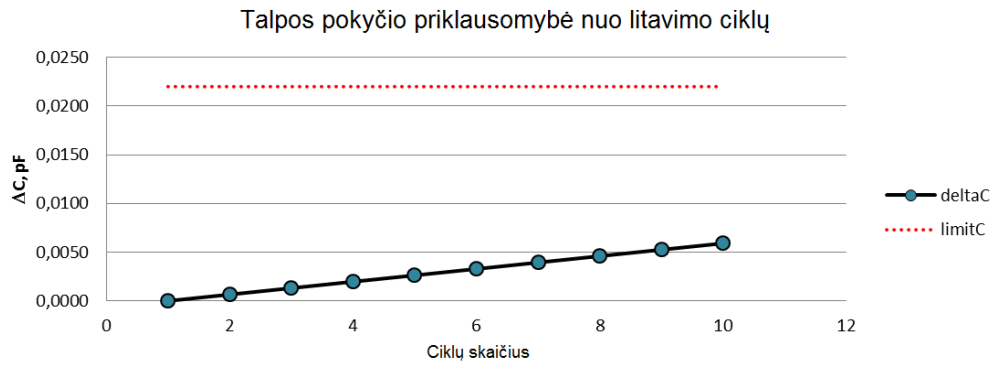


22 pav. Elektrinė matavimo grandinė

Buvo ieškoma literatūros paaiškinančios SMP savybių kitimą veikiant drėgmei įvairiuose gamybos procesuose. Pasinaudojant literatūros šaltiniais [15, 16] buvo įvertinti 25 pav., raudonai pažymėtų takelių parazitiniai talpumi. Paskaičiuotas parazitinio talpumo pokytis atliekant litavimo ciklus ir ilgalaikio drėgmės įsigėrimo poveikį. Nustatyta, jog litavimo ciklai veikia mažiau, o ilgalaikis drėgmės poveikis esamam sprendimui yra pavojingas. Analizuojant skaičiavimo rezultatus (23 pav.) nustatyta, jog dėl drėgmės įsigėrimo, esamos SMP struktūrų parazitinis talpumo pokytis greičiau pasiekia leistiną ribą (raudona linija), tuo tarpu litavimo ciklai šiuo atveju mažiau įtakoja neleistinus talpumo pokyčius.



23 pav. Apskaičiuota talpos priklausomybė nuo drėgmės



24 pav. Apskaičiuota talpos priklausomybė nuo drėgmės

GP22 techniniame aprašyme nėra nurodytos susidaranti parasitinės nuotėkių srovės, tačiau paprastai parasitinės srovės CMOS technologijoje siekia keliasdešimt nA. Kai skaičiavimai parodė, jog leistina riba yra mažiau 1nA.

2 lentelė. Komponentų tolerancijų ir parazitinių komponentų įtaka prieš pakeitimus

Komponentas	Nominalas	Tol.	Temp. stabilumas
R95, R96	100 Ω	1 %	100 ppm/°C
R6, R7	560 Ω	1 %	100 ppm/°C
C8, C10	33 pF	1 %	60 ppm/°C NPO
C77, C79	390 pF	5 %	60 ppm/°C NPO
C3, C4	10000 pF	5 %	50000 ppm/°C X7R

Parazitinis efektas	Nominalas "nulio dreifas" Δt	Nom.+5% reikšmė	Nom.+5% reikšmė "Nulio dreifas" Δt
U10.27, U10.30	-40 ps	0.6 pF	644 ps
U10.27, U10.30	-66 ps	160 MΩ	462 ps

Išanalizavus visus komponentus kurie gali turėti įtakos nulio dreifui, pastebėta, kad C3 ir C4 kondensatoriai turi prastą temperatūros stabilumą, todėl kintant temperatūrai ant abiejų matavimo grandinių, stipriai keičiasi Δt laikas.

Pakeitus C3 ir C4 kondensatorius, bei padidinus C77 ir C79 kondensatorių talpą pastebimas žymus parazitinio Δt laiko sumažėjimas (2 lentelė). Pastaba: po pakeitimų R6, R7, C8 ir C10 nebenaudojami, jų filtravimo funkcija buvo iškelta į alternatyvų ultragarsinių keitiklių prijungimo prie elektronikos sprendimą. Siekiant sumažinti SMP plokštės elementų įtaką, U10 išvaduose 27 ir 30 (Stop1, Stop2)

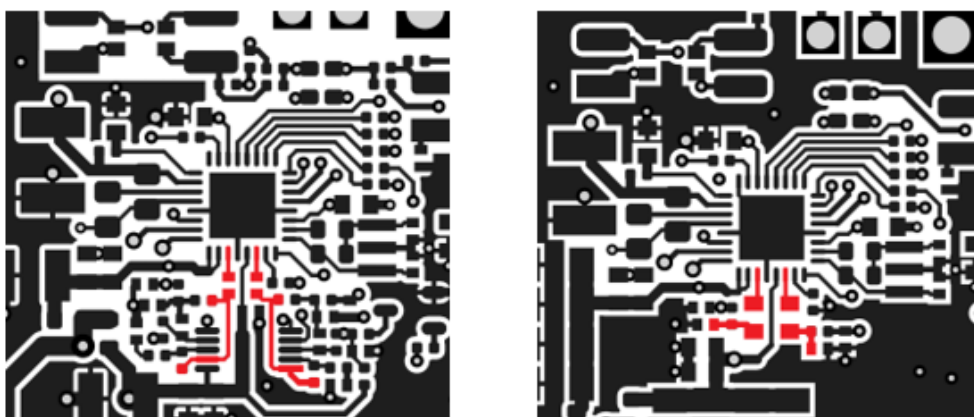
atsirandančios nuotėkio srovės, bei sumažinti talpumų pokyčiai sumažinus PCB laidininkų plotą, pakeitus jų konfiguraciją (25 pav.).

3 lentelė. Komponentų tolerancijų ir parazitinių komponentų įtaka po pakeitimų.

Komponentas	Nominalas		Tol.		Temp. stabilumas		
R95, R96	220	Ω	1	%	100	ppm/°C	
C77, C79	10000	pF	5	%	60	ppm/°C	NPO
C3, C4	10000	pF	5	%	60	ppm/°C	NPO

Parazitinis efektas	Nominalas "nulinio dreifas" Δt		Nom.+5% reikšmė		Nom.+5% reikšmė "Nulinio dreifas" Δt	
U10.27, U10.30	-13	ps	33	pF	5	ps
U10.27, U10.30	-15	ps	160	M Ω	0	ps

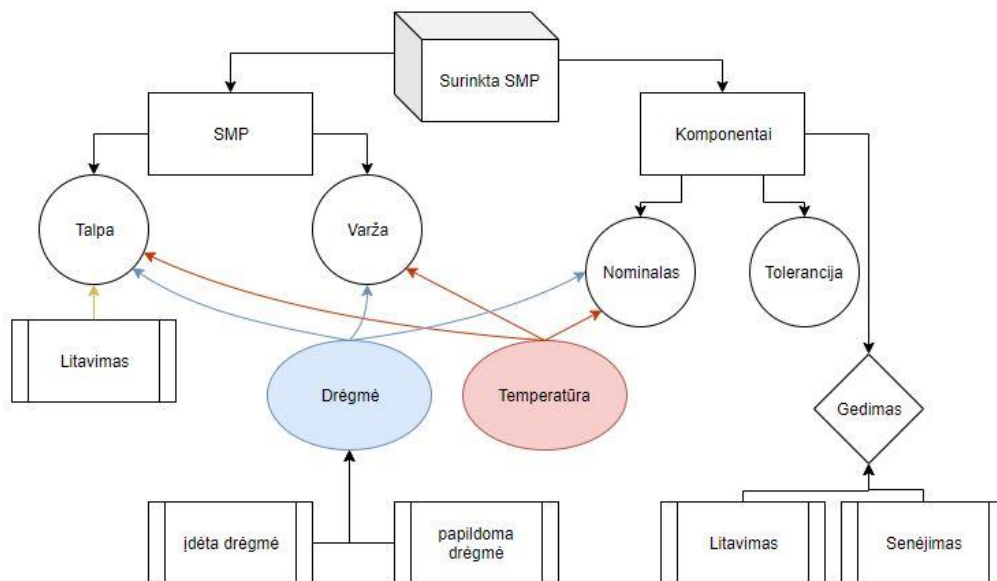
Įtarus galimą drėgmės poveikį, buvo tiriami visi veiksniai galintys sukelti drėgmės pakitimus SMP plokštėje eksploatacijos laiku.



25 pav. SMP takeliai prieš (kairėje) ir po pakeitimų (dešinėje)

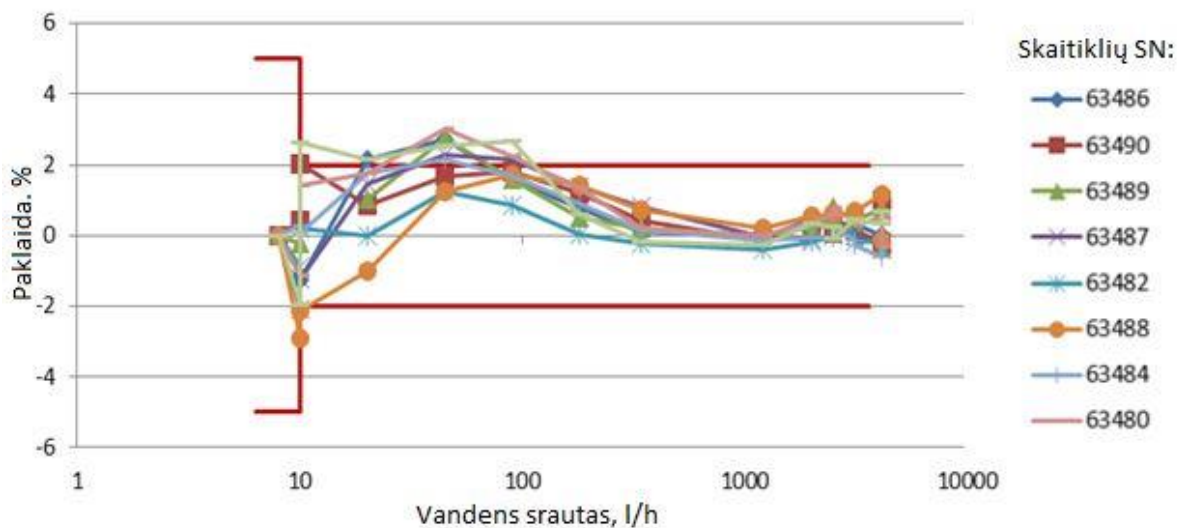
Pagal gaunamus rezultatus buvo iškelta prielaida, kad drėgmė į prietaisą gali patekti per jo korpuso sieneles. Todėl pagal DIN53122 standartą paskaičiuota, kad elektroninio bloko dėžutė (ASA plastikas) per ilgą laiką absorbuoja bei praleidžia drėgmę per savo sieneles. Atlikti skaičiavimai rodo, kad per 15 metų el. bloko dėžutė gali praleisti 15 g. vandens. Dėl šio efekto didėja santykinė drėgmė dėžutėje, drėgmė kondensuojasi ant SMP plokštės bei keičia talpą tarp komponentų išvadų, bei takelių.

Stengiantis sumažinti šį efektą, spausdintinio montažo plokštė buvo pertrasuota taip, kad signaliniai takeliai būtų kuo trumpesni ir komponentai būtų tinkamoje vietoje.



26 pav. Drėgmės bei temperatūros poveikis surinktai spausdintinio montažo plokštei (SMP)

Santykinę drėgmę dėžutėje galima šalinti ją absorbuojant specialiai tam skirta medžiaga – silikageliu. Žinant kiek gramų vandens išsiskirs dėžutėje per eksploataavimo laiką (blogiausias scenarijus – skaitiklis 16 metų visiškai panardintas po vandeniu), galima paskaičiuoti kiek gramų silikagelio



27 pav. Po drėgmės bandymo kompensavus nulio dreifą prie 6 l/h

reikės. Kadangi silikagelis gali absorbuoti apie 40 % (nuo savo masės) vandens, reiškia, kad reikės bent 21 g. silikagelio, kad jis absorbuotų visą išsiskyrusią drėgmę.

Atlikus visus šiuos pakeitimus, prietaisai buvo iš naujo sukalibruoti. Jiems buvo atliktas toks pat drėgmės testas bei patikrinus prietaisus po testo buvo gauti rezultatai, kurie rodo ženklų nulio dreifo sumažėjimą.

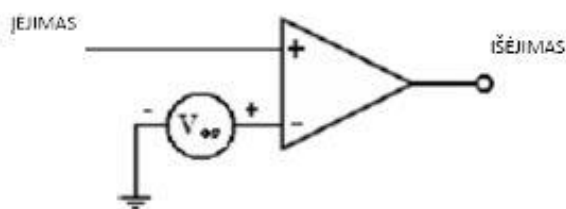
2.3. Keitiklių žadinimo ir signalo aptikimo bei apdorojimo algoritmai

Kaip buvo nustatyta ankstesnio skyriaus tyrimuose priimamo ultragarso signalo lygis nėra pastovus. Jis priklauso nuo tekančio skysčio savybių, nuo ultragarso keitiklio temperatūrinių charakteristikų ir gali keistis laikui bėgant dėl senėjimo. Keitiklių žadinimo ir grįžtančio signalo priėmimo grandinės ir signalo apdorojimo algoritmai turi būti prisitaikantys priimamo signalo amplitudei, ultragarsinių keitiklių bei imtuvų/siūstuvų grandinių charakteristikų skirtumams.

Toliau šiame darbe bus kalbama apie būdus, kurie leidžia padidinti matavimo rezultatų patikimumą įvairių poveikių atžvilgiu.

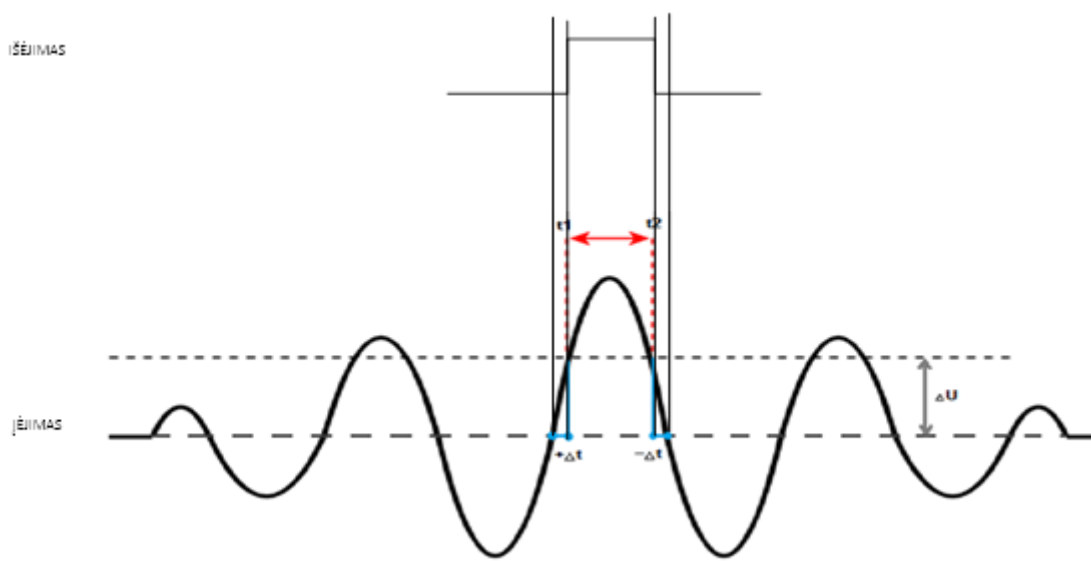
Pirmiausiai priimamas analoginis signalas yra keičiamas į skaitmeninį analoginiu komparatoriumi. Šis komponentas idealiu atveju turėtų lyginti signalą nulio atžvilgiu, tačiau realių komparatorių lygis yra perstumtas nulio atžvilgiu (ΔU). Šis lygis priklauso nuo darbo režimo (maitinimo įtampos, aplinkos temperatūros taip pat dėl komponento senėjimo). Be to, realiose sąlygose dirbančio prietaiso priimamo signalo amplitudė taip pat nėra stabili, dėl visų šių priežasčių lyginant įtampas atsiranda laiko matavimo paklaidos (25 pav., Δt_1 ir Δt_2). Atkreiptas dėmesys, jog šias paklaidas galima eliminuoti vidurkinant abiejų signalo frontų (kylančio ir krentančio) reikšmes:

$$t_{vid} = \frac{t_1 - \Delta t + t_2 + \Delta t}{2} = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (3)$$



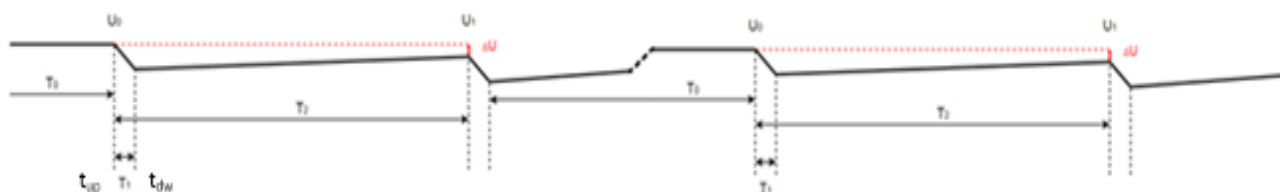
28 pav. Priimamo signalo imtuvo komparatoriaus grandinė

Tyrinėjant buvo atkreiptas dėmesys į maitinimo įtampos svyravimus. Elektronikos komponentuose vėlinimas priklauso nuo maitinimo įtampos, pvz. buferio NLX2G16AMUTCG [12] vėlinimas 1.8ns prie 5V maitinimo įtampos ir 8ns prie 1.8V, t.y. turime 1,9 ps/mV maitinimo šaltinio įtakos faktorių.



29 pav. Priimamo signalo sklaidimo laiko matavimas

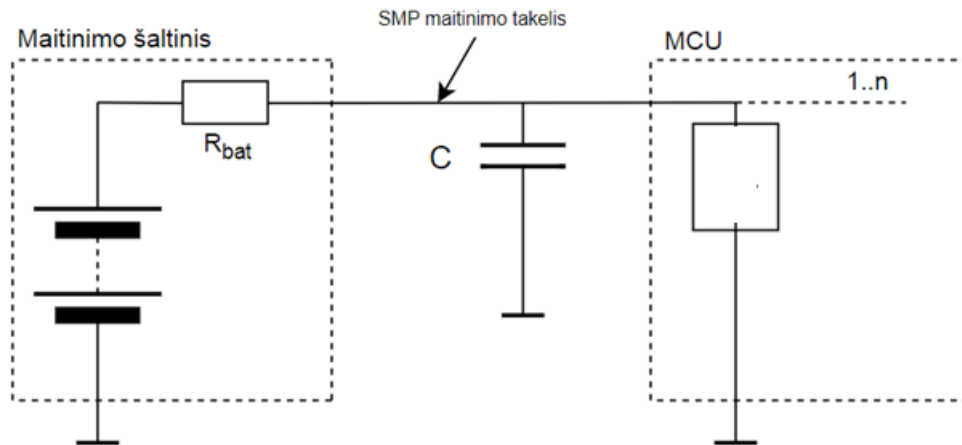
Ultra mažo energijos vartojimo bateriniuose prietaisuose maitinimo įtampa svyruoja dėl to, kad matavimo metu elektrinės grandinės naudoja (tūkstančius kartų) didesnę energiją, nei budėjimo metu, o maitinimo šaltinis – baterija nėra idealus ir turi pakankamai didelę (iki 500 Omų) vidinę varžą.



30 pav. Maitinimo įtampos svyravimai periodinio matavimo metu

30 pav. pavaizduotas maitinimo įtampos svyravimas, sklaidimo laiko matavimo metodu paremtas skysčio srauto sensorius periodiškai (kas T_0) atlieka sklaidimo laiko (siunčiamas signalas prieš ir pagal srauto tekėjimo kryptį) trukmės matavimus. Sklaidimo laiko matavimo metu elektronikos grandinės, kaip minėta aukščiau, naudoja didesnę srovę, dėl to maitinimo šaltinio įtampa nukrenta, matavimo procesas trunka T_1 laiko. Pakeičiant matavimo kryptį reikia palaukti žymiai ilgesnį laiką (T_2), nes reikia palaukti kol užgesta pagrindinis signalas (atsispindintis tarp keitiklių), bei visoje konstrukcijoje sužadinti šalutiniai signalai, kurie priešingu atveju sukurtų matavimo paklaidas. Per laiką T_2 maitinimo šaltinio įtampa atsistato iki lygio (U_1), t.y. skirtingieji matavimai atliekami prie skirtingų maitinimo šaltinio įtampų – pirmasis matavimas prie U_0 , o antrasis prie U_1 , susidaręs įtampos skirtumas (ΔU) sukuria skirtingus vėlinimus elektronikos grandinėse. Šis vėlinimas yra nepastovus,

nes ΔU priklauso nuo daugybės faktorių, pirmiausiai, baterijos vidinė varža laikui bėgant keičiasi dėl senėjimo, dėl baterijos darbo režimo ir dėl temperatūros.



31 pav. Supaprastinta maitinimo grandinės schema

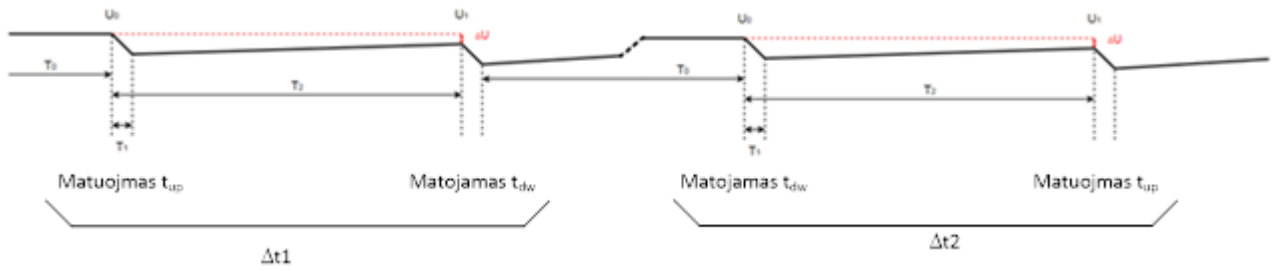
Analizuojant matavimo procesą, buvo sukurtas specialus matavimo sekos algoritmas, kuris leidžia eliminuoti ΔU įtaką matavimo rezultatams (30 pav.). Mikrokontroleris periodiškai (kas T_0 intervalą) matuoja signalo sklidimo laiką prieš srauto tekėjimo kryptį (t_{up}) ir po to pasroviui (t_{dw}), tarp šių matavimų įvestas T_1 intervalas sukuria periodinį maitinimo įtapos svyravimą ΔU . Skaičiuojant sklidimo laikų skirtumą gauname $\Delta t = t_{up} - (t_{dw} + \Delta t(\Delta U))$ dėl skirtingų maitinimo įtampų matavimo metu, atsiranda elektronikos komponentų vėlinimo dedamoji $\Delta t(\Delta U)$ priklausanti nuo ΔU . Tačiau, jei pirmasis iš laiko skirtumo matavimų periodiškai būna prieš srauto tekėjimo kryptį (t_{up}), po to pasroviui (t_{dw}), ir taip toliau, (kaip pavaizduota 32 pav.), tai vidurkinant du gretimus laiko skirtumo, tokios sekos, matavimus, galima eliminuoti $\Delta t(\Delta U)$ įtaką:

$$\Delta t_1 = t_{up1} - (t_{dw1} + \Delta t(\Delta U)) \quad (4)$$

$$\Delta t_2 = (t_{up2} + \Delta t(\Delta U)) - t_{dw2}$$

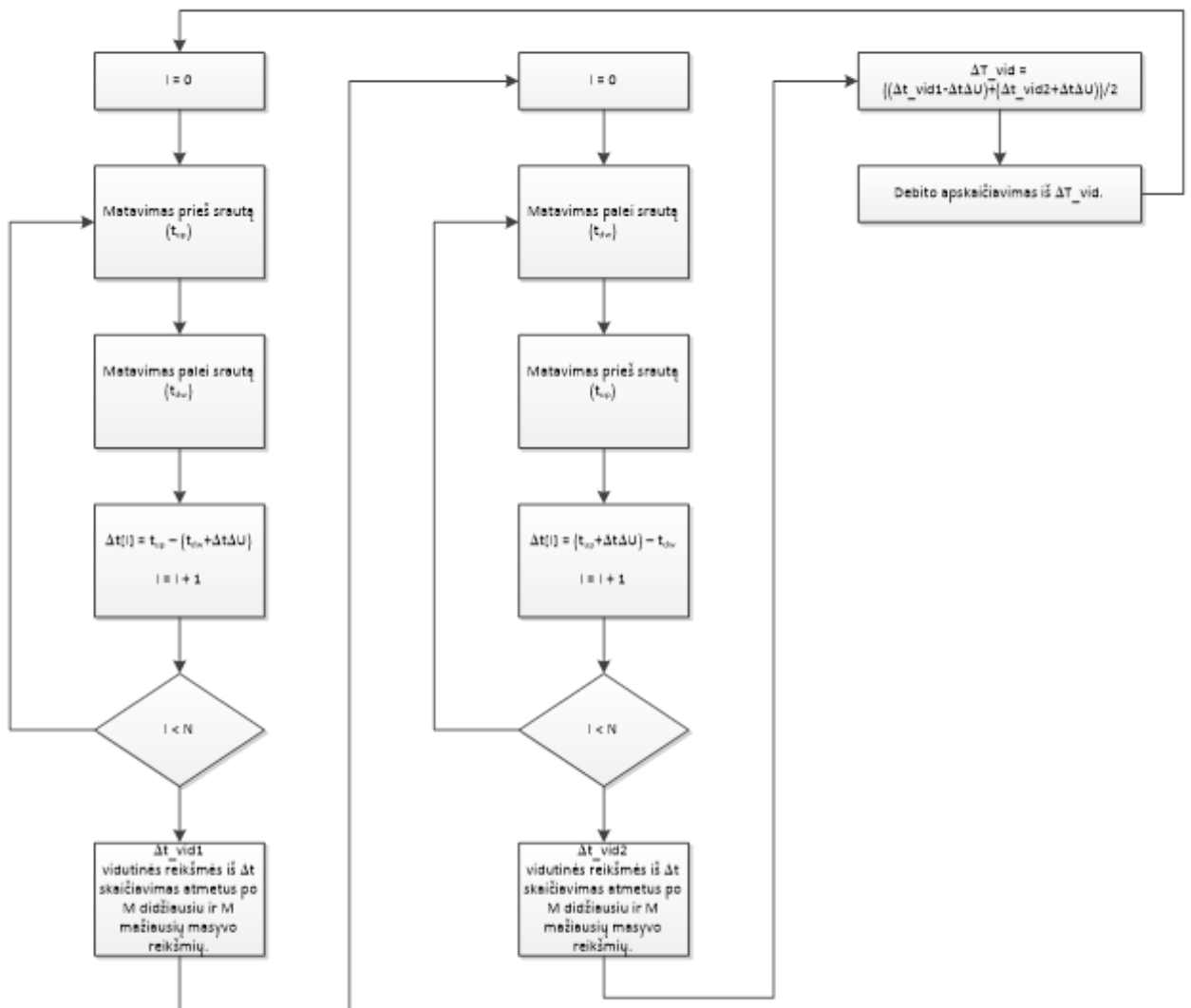
(5)

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2} = \frac{t_{up1}}{2} + \frac{t_{up2}}{2} + \frac{\Delta t(\Delta U)}{2} - \left(\frac{t_{dw1}}{2} + \frac{t_{dw2}}{2} + \frac{\Delta t(\Delta U)}{2} \right) \\ &= \frac{t_{up1}}{2} + \frac{t_{up2}}{2} - \frac{t_{dw1}}{2} - \frac{t_{dw2}}{2} \end{aligned}$$



32 pav. Maitinimo įtampos svyravimus kompensuojanti tup ir tdw matavimų išdėstymo schema (kompensuojasi skaičiuojant dviejų gretimų $\Delta t1$ ir $\Delta t2$ matavimų vidurkį).

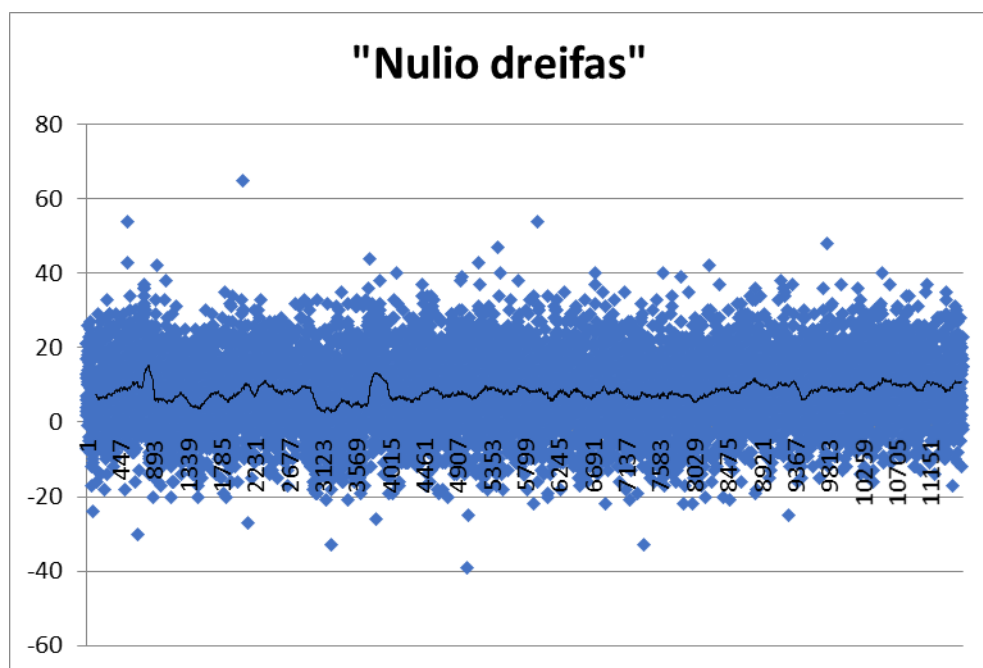
Realiuose matavimuose pasitaiko įvairių situacijų, kai negalime žinoti ar priimtas signalas nebuvo iškraipytas įvairių atsitiktinių triukšmų (pvz., oro burbuliukai ar kitos priemaišos tekančiame skystyje). Dėl to būtina tokias atsitiktines klaidas eliminuoti. Tam geriausiai tinka vidurkio skaičiavimas, kai skaičiavime nenaudojamos didžiausios ir mažiausios serijoje pasitaikiusios



33 pav. Matavimo sekos ir rezultatų apdorojimo algoritmas

reikšmės, t.y. vienodas skaičius, viena, dvi ar daugiau mažiausių ir tiek pat didžiausių matavimų serijos elementų nenaudojama vidurkio skaičiavime.

Po atliktų tyrimų, buvo sukurtas matavimo sekos ir išmatuotų rezultatų apdorojimo algoritmas (33 pav.), kuris eliminuoja pagrindinius nekontroliuojamus faktorius, mažinančius ilgalaikį laiko skirtumo (t.y. matuojamo skysčio debito) matavimo tikslumą – signalo nestabilumą, jėgimo grandinių neidealumą, bei maitinimo šaltinio efektus.



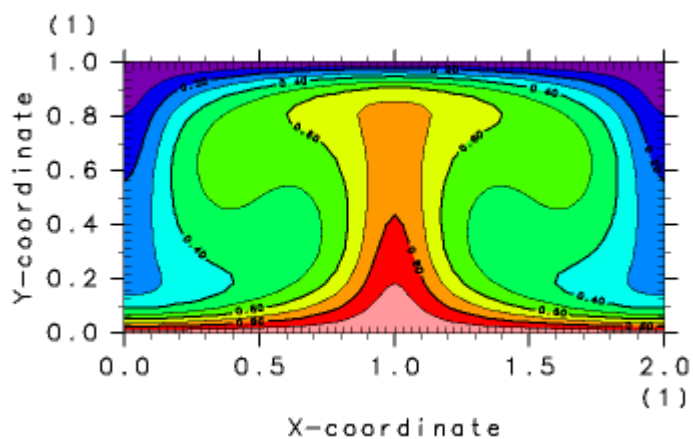
34 pav. Nulio dreifas po pakeitimų.

Atlikus visus darbe išvardintus pakeitimus buvo pasiektas 5 kartus mažesnis (21 ir 27 pav.) – 15-17ps ilgalaikis „nulio dreifas“, pavienio matavimo barstymasis siekia +/-20-30ps (mėlyni taškai).

2.4. Pastebėjimai

Darbo metu pastebėta, kad visiškai pašalinti nulio dreifo nepavyksta, todėl daroma prielaida, kad nulio dreifas šiuo atveju gali būti ne tik komponentų bei parazitinių srovių priežastis, bet galbūt tai gali būti cheminių bei fizikinių procesų dalis. Netekant srautui vanduo matavimo ruože turėtų stovėti, tačiau energijos skaitikliais tekančio vandens temperatūra dažniausiai kinta nuo kambario temperatūros iki 60-80°C. Tai reiškia, kad srauto matavimo kanalas kambario temperatūros atžvilgiu gali turėti didelį temperatūrinį skirtumą, todėl matavimo kanale gali susidaryti šiluminės konvekcija

(35pav.) [20,21]. Vykstant konvekcijai, vanduo temperatūros matavimo kanale gali tekėti ratais bei sūkuriais savaime, taip sukurdamas vandens tekėjimą.



35 pav. Šiluminė konvekcija

Taip pat nulinę dreifą gali lemti vandens cheminė sudėtis, bei vandens molekulių tarpusavio judėjimas. Šiame skyriuje minėtos prielaidos darbe toliau nėra nagrinėjamos bei tiriamos, tai lieka tik pastebėjimas, kuris bus tiriamas tolimesniuose tyrimuose siekiant sumažinti nulinę dreifą bei taip padidinti skaitiklių dinaminį matavimų diapazoną.

Išvados

1. Išanalizavus dinaminio matavimo diapazono praplėtimo galimybes energijos – eksurgijos skaitikliui buvo išsiaiškinti pagrindiniai parametrai nusakantys šilumos skaitiklių veikimą. Dinaminio matavimo diapazono praplėtimas reiškia skaitiklio gebėjimą matuoti srautą platesnėse ribose. Šis procesas grindžiamas skaitiklių konstrukcijų optimizacijos strategijomis. Pagal pirmąją strategiją energijos srauto skaitiklio tikslumą galima pagerinti net ir tada, kai srauto profilis nėra stabilus arba daugėja ultragarsinio signalo sklidimo kelių skaičius, ar naudojamas išlenktas sklidimo kelias. Antroji strategija teigia, jog reikia optimizuoti matavimo kanalo konfigūraciją naudojant srauto profilio lygintuvus arba keičiant ir stabilizuojant srauto tekėjimo profilį. Trečioji strategija yra paremta ultragarsinio signalo sklidimu matavimo kanale atsižvelgiant į jo formą, bei skysčio įtekėjimo kampą į matavimo kanalą.
2. Antrojoje darbo dalyje buvo ištirtas matavimo ruožo kanalas bei atlikti skaičiavimai. Išsiaiškinta, kad dėl papildomo triukšmo atsiradimo gali būti kalta matavimo ruožo konstrukcija bei netinkamai parinkti matmenys nuo keitiklio iki matavimo kanalo. Pasiūlytas sprendimas papildomai apdirbti matavimo kanalą arba keisti atstumą nuo keitiklio iki matavimo kanalo.
3. Buvo tyrinėjamas nulio dreifas ir išsiaiškinta, kad jis priklauso ne tik nuo komponentų parinkimo bei jų išdėstymo SMP plokštėje bet ir nuo drėgmės patekimo į prietaiso vidų. Paskaičiuota kiek drėgmės per prietaiso gyvavimo laiką gali praleisti jo korpusas ir pasiūlytas silikagelio kiekis reikalingas drėgmei sugerti. Taip pat buvo tiriamas keitiklių žadinimo ir signalo aptikimo bei apdorojimo sprendimas, išvesta formulė bei algoritmas leidžiantys eliminuoti įtampos šuolius matavimo metu.
4. Pritaikius pasiūlytus dinaminio matavimų diapazono išplėtimo metodus buvo 5 kartus (nuo 5-10% iki 1-2 %) sumažintas nulio dreifas prie minimalių skaitiklio srautų. Tai reiškia, kad skaitiklis gali efektyviai veikti tekant minimaliam srautui.
5. Pastebėta galima šiluminės konvekcijos dedamoji nulio dreifui. Pasiūlyta tolimesniuose tyrimuose atsižvelgti bei papildomai ištirti šiluminės konvekcijos bei vandens difuzijos reiškinius ir jų galimybes būti nulio dreifo priežastimis.

Literatūros sąrašas

1. OZGENER, Leyla; OZGENER, Onder. Monitoring of energy exergy efficiencies and exergoeconomic parameters of geothermal district heating systems (GDHSs). *Applied Energy*, 2009, 86.9: 1704-1711.
2. DINCER, Ibrahim; ROSEN, Marc A. *Exergy: energy, environment and sustainable development*. Newnes, 2012.
3. BROOKLYN MICROGRID. *Exergy-Exergy Whitepaper 2016*. LO3 Energy.
4. DINCER, Ibrahim; ROSEN, Marc A. *Exergy: energy, environment and sustainable development*. Newnes, 2012.
5. BAGDANA VIČIUS, A. - MARTINA ITIS, V. Ekserginė analizė ir eksergoekonomika . Kombinuoto ciklo kogeneracinės jėgainės studija. *Energetika* . 2012. no. 2, p. 55–65.
6. BAGDONAS, A. et al. Triangular cross section duct for ultrasonic flow rate measurement. *Ultragarsas* 2005. Vol. 4, no. 4, p. 7–10.
7. BIEKŠA, D. Pastato inžinerinių sistemų procesų integravimo vertinimas taikant eksergijos kriterijų. Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2008.
8. GUDZINSKAS J., LUKOŠEVIČIUS V., MARTINA ITIS V., TUOMAS E. Šilumos vartotojo vadovas. Vilnius: Lietuvos šilumos tiekėjų asociacija, 2011. 130 p.
9. DUFFELL, C.J. Application of optimization techniques to the design of ultrasonic transit-time flowmeters. 2004.
10. IPPONMATSU, MASAMICHI; MATSUSHITA, HIROSHI; TAGAWA, S. 2002. Japan.
11. VALIUKĖNAS, V.J. *Ultragarsas*. Visuotinė lietuvių enciklopedija [interaktyvus]. 2013. p. 351. Prieiga per internetą: <<https://www.vle.lt/Rodykle/ctl/Straipsnis/mid/469/tid/97831>>.
12. WONG, T.T. - LEUNG, C.W. Forced-convection augmentation of turbulent flow in a triangular duct with artificially roughened internal surfaces. *Experimental Heat Transfer* . 2002. Vol. 15, p. 89–106.
13. REYNOLDS, Frederick H. Thermally accelerated aging of semiconductor components. *Proceedings of the IEEE*, 1974, 62.2: 212-222.
14. ACAM Ultrasonic-Flow-Converter. Data Sheet. [interaktyvus]. 2015. Prieiga per internetą: <http://www.acam.de/fileadmin/Download/pdf/UFC/English/DB_GP30_Vol1_en.pdf>.
15. Pb-Free Reflow, PCB Degradation, and the Influence of Moisture Absorption, Kerin O’Toole, Bob Esser, Seth Binfield, and Craig Hillman, DfR Solutions, College Park, MD Joe Beers, Gold Circuits.
16. PCB Impedance and Capacitance Calculator, <https://technick.net/tools/impedance-calculator/>

17. NLX2G16AMUTCG, Dual buffer, <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/NLX2G16-D.PDF>
18. ALLEYNE, David N.; CAWLEY, Peter. Optimization of Lamb wave inspection techniques. *Ndt & E International*, 1992, 25.1: 11-22.
19. KESSLER, Seth S.; SPEARING, S. Mark; SOUTIS, Constantinos. Damage detection in composite materials using Lamb wave methods. *Smart materials and structures*, 2002, 11.2: 269.
20. Chandrasekhar, S., 1961 : Hydrodynamic and Hdromagnetic stability. Oxford University Press.
21. Ishiwatari, M., Takehiro, S., Hayashi, Y.-Y., 1994 : The effects of thermal conditions on the cell sizes of two-dimensional convection. *J. Fluid Mech.*, 281, 33--50.
22. BUSSE, F. H. Non-linear properties of thermal convection. *Reports on Progress in Physics*, 1978, 41.12: 1929.
23. KAŽYS, R., et al. 3D analysis of interaction of Lamb waves with defects in loaded steel plates. *Ultrasonics*, 2006, 44: e1127-e1130.