

Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Bioimplantams skirtų magnetinių jutiklių tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

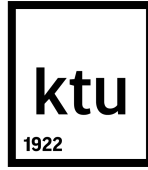
Mindaugas Viskupaitis

Projekto autorius

Prof. dr. Vaidotas Marozas

Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Bioimplantams skirtų magnetinių jutiklių tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Biomedicininė inžinerija (6211EX002)

Mindaugas Viskupaitis

Projekto autorius

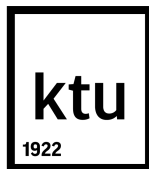
Prof. dr. Vaidotas Marozas

Vadovas

Prof. dr. Vytautas Markevičius

Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Mindaugas Viskupaitis

Bioimplantams skirtų magnetinių jutiklių tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Mindaugo Viskupaičio, baigiamasis projektas tema „Bioimplantams skirtų magnetinių jutiklių 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)

Viskupaitis, Mindaugas. Bioimplantams skirtų magnetinių jutiklių tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Vaidotas Marozas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis: Bioinžinerija, inžinerijos mokslai

Reikšminiai žodžiai: belaidžiai matavimai, temperatūros ir deformacijų jutikliai, magnetiniai jutikliai

Kaunas, 2019. 45 psl.

Santrauka

Magnetiniai bistabilūs jutikliai dėl savo unikalių savybių sulaukia vis daugiau dėmesio. Šių jutiklių magnetinės histerezės plotis yra jautrus temperatūrai ir deformacijoms. Histerezės plotis yra įvertinamas nekontaktiniu būdu, registruojant jutiklio reakciją į kintantį magnetinį lauką. Nekontaktinis duomenų nuskaitymas itin palengvina šių jutiklių integravimą į medžiagų vidines struktūras ir suteikia joms plačias panaudojimo galimybes įskaitant mediciną ar aviaciją. Nors magnetiniai bistabilūs jutikliai ir yra aktyvi tyrimų sritis, informacijos apie jų taikymą sprendžiant praktinius uždavinius bei reakcijas į išorinius faktorius trūksta.

Šio darbo tikslas yra ištirti magnetinių bistabilių jutiklių galimybę registruoti temperatūrą ir deformacijas nekontaktiniu būdu. Darbo analitinėje dalyje apžvelgiamos jutiklių gamybos technologijos, magnetinės savybės ir histerezės pločiui įtaką darantys veiksniai.

Darbo metodinėje dalyje aprašoma temperatūros ir deformacijų tyrimų eksperimentinė įranga. Aiškinamas signalų modeliavimo algoritmas, skirtas signalų filtravimo ir parametrizavimo metodams testuoti.

Rezultatų dalyje pateikiami žadinimo ričių sukuriama magnetinio lauko modeliavimo rezultatai. Apžvelgiami atsako signalų filtravimo rezultatai gauti taikant modeliuotus ir realius signalus. Įvertinama sukurto histerezės pločio matavimo algoritmo paklaida. Analizuojama išorinių faktorių (temperatūros, deformacijų, nuolatinio ir žadinimo magnetinio lauko) įtaka jutiklio histerezės pločiui. Darbo pabaigoje pateikiami pasiūlymai tolimesniems tyrimams ir išvados.

Viskupaitis, Mindaugas. Investigation of magnetic sensors for bioimplants. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Vaidotas Marozas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study area and are: Bioengineering, Engineering Science

Keywords: wireless measurements, temperature and mechanical stress sensors, magnetic field sensors

Kaunas, 2019. 45 pages.

Summary

Magnetic bistable sensors due to their unique properties are getting more and more attention. Magnetic hysteresis width of bistable sensors is sensitive to temperature and mechanical stresses. In addition, hysteresis width is evaluated wirelessly by analyzing sensor's reaction to the alternating magnetic field. Contactless measurement possibility allows to integrate bistable sensors inside the materials and makes them suitable for many monitoring applications like medicine and aviation. Although magnetic bistable sensors are an active research field, there is little information about their practical application and response to external factors.

The aim of this work is to investigate the possibilities of wireless temperature and mechanical stress measurements using magnetic bistable sensors. In the analytic part of this work manufacturing technologies, magnetic properties and factors affecting hysteresis width of bistable sensors are described.

Equipment for temperature and mechanical stress experiments is described in the methodical part of this work. Moreover, signal modeling algorithms for testing signal filtering and parameterization methods are explained there.

Simulation results of magnetic field distribution generated by different types of excitation coils are presented and discussed in the results section. In addition, filtering quality results obtained from testing the proposed filtering method with simulated and real response signals are included. An error of automated hysteresis width measurement algorithm was also evaluated. Furthermore, impact of external factors (temperature, permanent and alternating magnetic field) to the hysteresis width of the sensors are described and analyzed. Conclusions and future directions are presented at the end of this work.

Turinys

Įvadas	7
1. Magnetinių mikrojutiklių technologijos analizė	8
1.1. Mikrovielučių gamyba ir naudojamos medžiagos	8
1.2. Magnetinio bistabilumo reiškiny	9
1.3. Histerezės pločiui įtaką darantys veiksniai	10
1.3.1. Nuolatinio magnetinio lauko įtaka histerezės pločiui	10
1.3.2. Mikrovielutės geometrinių charakteristikų įtaka histerezės pločiui	11
1.3.3. Temperatūros ir magnetinio lauko dažnio įtaka histerezės pločiui	12
1.3.4. Mechaninių deformacijų įtaka histerezės pločiui	13
1.4. Patentuoti sprendimai temperatūrai ir mechaninėms deformacijoms registruoti	15
1.5. Skyriaus apibendrinimas	16
2. Metodai	17
2.1. Eksperimentinė įranga	17
2.1.1. Temperatūrinio poveikio tyrimo stendas	18
2.1.2. Mechaninio poveikio tyrimo stendas	19
2.2. Histerezės pločio įvertinimo algoritmas	20
2.3. Mikrovielutės signalo išskyrimo metodas	21
2.4. Atsako ir žadinimo signalo modeliavimas	22
2.5. Mikrovielutės generuojamų impulsų detektorius	25
2.6. Nulio kirtimo detektorius	26
3. Rezultatai	27
3.1. Žadinimo ritės sukuriama magnetinio lauko modeliavimas	27
3.2. Modeliuotų signalų tyrimai	28
3.2.1. Filtravimo metodo vertinimas	28
3.2.2. Impulsų detektoriaus vertinimas	31
3.2.3. Nulio kirtimo ir histerezės pločio algoritmų vertinimas	32
3.3. Realių signalų tyrimai	34
3.3.1. Mikrovielutės signalų analizė	34
3.3.2. Poveikio nuolatiniu magnetiniu lauku tyrimai	35
3.3.3. Temperatūros ir mechaninių deformacijų tyrimai	37
Diskusija	42
Išvados	43
Literatūros sąrašas	44
Priedai	46
1 priedas. „Labview“ grafinė vartotojo sąsaja	46
2 priedas. Temperatūrinio poveikio tyrimo stendas	47
3 priedas. Mechaninio poveikio tyrimo stendas	48
4 priedas. Analoginių signalų apdorojimo sistema	49
5 priedas. Darbo viešinimas „Technorama 2019“ parodoje	50

Ivadas

Magnetiniai mikrojutikliai arba kitaip vadinamos stiklu dengtos mikrovielutės (SDM) (angl. *glass coated microwires*) dėl savo unikalių savybių susilaukia vis daugiau dėmesio. SDM magnetinės histerezės plotis yra jautrus temperatūrai ir deformacijoms dėl to daugelyje mokslinių publikacijų keliama, hipotezė, kad galbūt SDM galima panaudoti kaip ypač mažų matmenų belaidžius temperatūros ir deformacijų jutiklius [1, 2, 3]. SDM diametras siekia nuo 10 iki 120 μm , o ilgis nuo 2 mm iki kelių centimetrų [4]. Maži SDM matmenys leidžia jas tvirtinti prie norimo stebėti objekto nesukeliant pastebimo jo matmenų padidėjimo. Taip pat SDM nereikalauja energijos šaltinio tai suteikia joms didžiulį pranašumą lyginant su jutikliais naudojančiais išorinius energijos šaltinius. Histerezės pločio matavimai atliekami belaidžiu būdu, registruojant SDM atsaką į kintančio magnetinio lauko poveikį [2]. SDM savikaina yra nedidelė siekianti keletą centų, todėl gaminio, kuriame būtų integruojamos SDM savikaina praktiškai nepakistų [5, 6].

Svarstoma SDM naudoti, kuriant išmanius bioimplantus, kurie atliktų ne tik savo pagrindinę funkciją, bet ir suteiktų naudingos informacijos. Priklijavus SDM prie implanto paviršiaus, būtų galima sekti implanto mechanines savybes bei temperatūros kitimą, pooperaciniu laikotarpiu. Tai suteiktų informacijos apie galimą organizmo atmetimo reakciją ar infekciją, o mechaninių savybių stebėjimas leistų anksti pastebėti implanto struktūros pažeidimus ir užkirsti kelią lūžimui. Pirminiai tyrimai rodo, kad SDM pasižymi biosuderinamumu, todėl nekelia žalingo poveikio organizmui [5]. Tai ypač svarbu, nes biologinis saugumas yra vienas iš svarbiausių kriterijų implantuojamiems prietaisams [7].

SDM yra gana neseniai atrastos medžiagų struktūros, dėl to komerciškai prieinamų nekontaktinių jutiklių, paremtų SDM kol kas nėra. Mokslinėse publikacijose gausu informacijos apie SDM sandarą, skirtingų cheminių kompozicijų įtaką SDM magnetinėms savybėms, permagnetinimo procesus [4, 8, 9]. Tačiau trūksta informacijos apie praktinį SDM taikymą, nėra išsamiai ištirti išoriniai veiksniai darantys įtaką SDM savybėms. Taip pat nedaug pasiekta signalų apdorojimo srityje: nėra viešai publikuotų metodų leidžiančių išskirti SDM signalą iš atsako signalo ar aptikti SDM generuojamus impulsus.

Šio darbo tikslas – ištirti stiklu dengtų mikrovielučių galimybes registruoti temperatūrą ir deformacijas nekontaktiniu būdu.

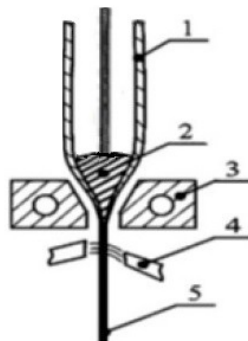
Tikslui pasiekti išsikelti šie uždaviniai:

1. išanalizuoti mikrovielučių fizikines savybes ir histerezės pločio įvertinimo principus;
2. pasiūlyti signalų apdorojimo metodiką mikrovielučių signalams išskirti;
3. išanalizuoti temperatūros ir deformacijų sukeltus pasikeitimus mikrovielučių signale;
4. įvertinti išorinių faktorių įtaką mikrovielučių histerezės pločiui.

1. Magnetinių mikrojutiklių technologijos analizė

1.1. Mikrovielučių gamyba ir naudojamos medžiagos

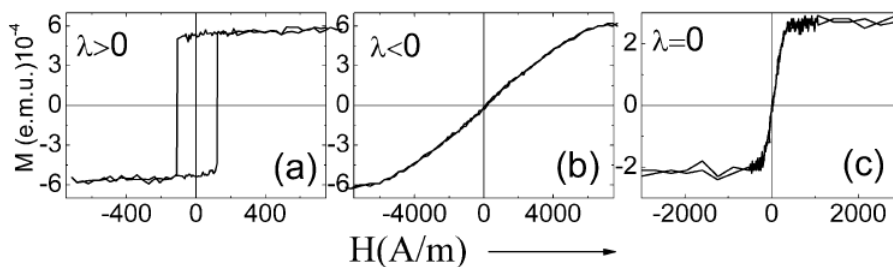
SDM sudaro 1–50 μm diametro metalo lydinio laidas, padengtas 2–20 μm stiklo sluoksniu [5]. SDM yra gaminamos pagal Taylor-Ulitovsky metodą (žr. 1.1 pav.) [10]. Gamybos metu metalo lydinys yra dedamas į stiklinį vamzdelį ir indukciniu metodu įkaitinamas iki lydymosi temperatūros. Įkaitęs lydinys pilnai užpildo stiklinį vamzdelį, o tempiant stiklinį vamzdelį su viduje esančiu metalo lydiniu pro šildymo elemente esančią skylę yra užtikrinamos reikiamos SDM geometrinės charakteristikos (stiklo padengimo storis ir metalinės šerdies diametras). Vėliau SDM atšaldoma vandeniui ar jo garais [10].



1.1 pav. SDM gamybos procesas taikant Taylor–Ulitovsky metodą. 1 – stiklinis vamzdelis, 2 – metalo lydinys, 3 – šildymo elementas su reikiamo diametro skylė, 4 – šaldymas, 5 – pagaminta SDM [10]

SDM gamyboje naudojami metalo lydiniai dažniausiai yra sudaryti iš šių cheminių elementų Co, Fe, Mn, Cr, Cu, B [10]. Lydiniai, kurių sudėtyje yra didelis kiekis Fe, pavyzdžiui: $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ pasižymi teigiama magnetostrikcijos konstanta $\lambda > 0$, magnetinio bistabilumo reiškiniu (angl. *magnetic bistability*) ir dėl šio reiškinio susidaranti stačiakampe magnetinės histerezės kilpa (žr. 1.2 pav. a) [4, 9]. Dėl magnetinio bistabilumo reiškinio daug Fe turintys lydiniai dažnai minimi mokslinėje literatūroje tiriant bekontaktes SDM temperatūros ar deformacijų matavimo galimybes. Lydiniai turintys didelį kiekį Co pasižymi neigiama magnetostrikcijos konstanta $\lambda < 0$, ir „S“ formos histerezės kilpa (žr. 1.2 pav. b). Šiuose lydiniuose magnetinio bistabilumo reiškinys nepasireiškia [4]. Lydinių, turinčių didelį kiekį Fe ir Co elementų, magnetostrikcijos konstanta yra artima nuliui $\lambda \sim 0$ [4]. Bistabilumo reiškinys šiuose lydiniuose yra įmanomas, jei magnetostrikcijos konstanta yra teigiama. Histerezės kilpos forma artima stačiakampei (žr. 1.2 pav. c)[4].

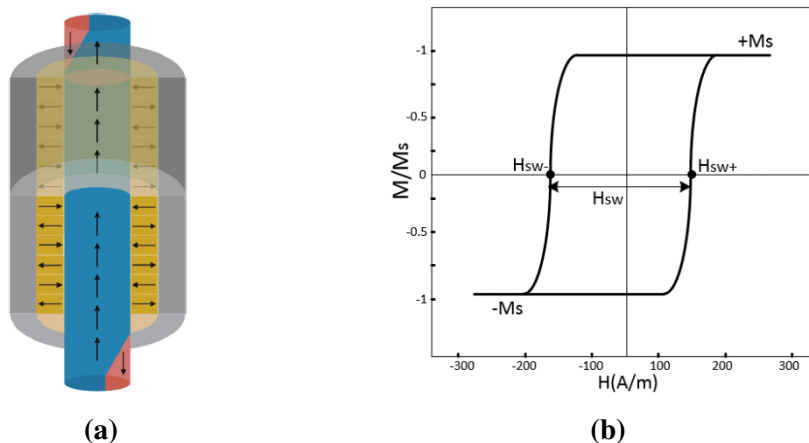
Dėl magnetinio bistabilumo reiškinio SDM stebima stačiakampė magnetinės histerezės kilpa. Histerezės kilpos plotis H_{sw} (angl. *switching field*) priklauso nuo daugelio parametrų: žadinimo magnetinio lauko dažnio, temperatūros, mechaninių deformacijų, kurias patiria SDM, SDM geometrinių charakteristikų, šerdies cheminės sudėties [2, 6]. Histerezės plotį galima įvertinti belaidžiu būdu, naudojant žadinimo ir priėmimo rites. Žadinimo ritė naudojama kintančiam magnetiniam laukui sukurti, o priėmimo - SDM generuojamam atsako signalui registruoti. Toks histerezės pločio įvertinimo metodas yra vadinamas indukciniu [6].



1.2 pav. Magnetinės histerezės kilpos užregistruotos SDM, turinčiuose didelį kiekį a) Fe ($\lambda > 0$), b) Co ($\lambda < 0$), c) Fe ir Co ($\lambda \sim 0$) medžiagų [4]

1.2. Magnetinio bistabilumo reiškinys

SDM pasižymi magnetinio bistabilumo efektu, jei yra ilgesnė už kritinį ilgį [4, 11]. SDM, kurių diametras $d \sim 10 \mu\text{m}$, kritinis ilgis yra apie 2 mm, o padidinus mikrovielutės diametrą iki $d \sim 120 \mu\text{m}$, kritinis ilgis išauga iki 7 cm [4]. Dėl šios priežasties mažo diametro vielutės yra pranašesnės nei didesnės. Magnetinio bistabilumo reiškiniu pasižyminties SDM, metalinėje dalyje esantis ašinis domenas gali būti vienoje iš dviejų stabilių įmagnetinimo būsenų: neigiamoje $-M_s$ arba teigiamoje $+M_s$ (žr. 1.3 pav. b)[5]. Domeno įmagnetinimo būseną keičiama, paveikiant SDM išoriniu magnetiniu lauku. Teigiamo poliarumo magnetinio lauko stipriui viršijus slenkstinę H_{sw+} vertę SDM ašinis domenas įmagnetinamas teigiamai $+M_s$ (žr. 1.3 pav. b). Neigiamo poliarumo magnetinio lauko stipriui viršijus slenkstinę H_{sw-} vertę ašinis domenas įmagnetinamas neigiamai $-M_s$ (žr. 1.3 pav. b). Tokie domeno įmagnetinimo būsenos pasikeitimai mokslinėje literatūroje vadinami *Barkhausen* šuoliais (angl. *Barkhausen jump*) [4].



1.3 pav. SDM pasižyminties teigiama magnetostrikcijos konstanta ($\lambda > 0$): a) magnetinių domenių išsidėstymas, kur mėlyna spalva – ašinis domenas, raudona spalva – galinis domenas, geltona spalva – radialinis domenas [2]; b) stačiakampė histerezės kilpa su pažymėtomis ribinėmis histerezės pločio vertėmis H_{sw-} ir H_{sw+}

Barkhausen šuolių metu, keičiantis domeno įmagnetinimo būsenai, SDM sugeneruoja trumpus teigiamus ir neigiamus įtampos impulsus, kuriuos įmanoma užregistruoti belaidžiu būdu priėmimo rite. Ašiniui domeniui keičiant būseną iš $-M_s$ į $+M_s$ SDM sugeneruoja teigiamos amplitudės įtampos impulsą, o keičiant būseną iš $+M_s$ į $-M_s$ – neigiamos amplitudės įtampos impulsą. Nenu-

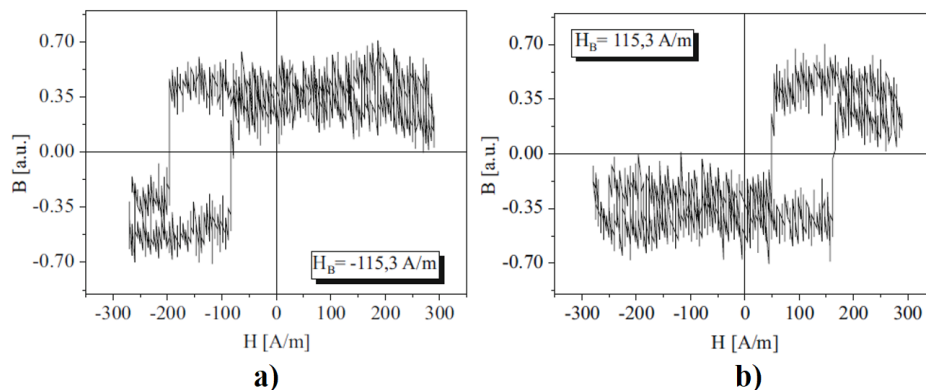
trūkstamas impulsų generavimas yra pasiekiamas veikiant SDM sinuso ar trikampio formos dėsnio kintančiu magnetiniu lauku [5]. SDM veikiančio magnetinio lauko stiprio (pvz., kintančio sinuso dėsnio) minimumų ir maksimumų vertės privalo būti didesnės nei ribinės magnetinės histerezės pločio vertės H_{sw-} ir H_{sw+} . Jei magnetinio lauko stipris neviršija bent vienos iš slenkstinių H_{sw-} ar H_{sw+} verčių — *Barkhausen* šuoliai nevyksta, o SDM negeneruoja impulsų [4].

Histerezės plotis H_{sw} įvertinamas matuojant SDM generuojamų impulsų padėtį, atžvilgiu žadinimo signalo perėjimų per nulį. Detalus SDM signalų registravimo aprašymas su histerezės pločio įvertinimo principais pateiktas „Metodų“ skiltyje.

1.3. Histerezės pločiui įtaką darantys veiksniai

1.3.1. Nuolatinio magnetinio lauko įtaka histerezės pločiui

Išorinis pastovus magnetinis laukas (pvz., Žemės magnetinis laukas) sukelia SDM histerezės kilpos persislinkimą (žr. 1.4 pav) [12]. Histerezės kilpos persislinkimo kryptis priklauso nuo magnetinio lauko poliarumo. Veikiant SDM pastoviu neigiamo poliarumo magnetiniu lauku histerezės kilpa persislenka į kairę, neigiamų magnetinio lauko stiprio verčių link (žr. 1.4 pav a). Dėl šio histerezės persislinkimo, išauga H_{sw-} slenkstinė vertė, leidžianti magnetinį domeną įmagnetinti neigiamai $-M_s$, bet tuo pat metu sumažėja H_{sw+} vertė leidžianti, domeną įmagnetinti teigiamai $+M_s$. Paveikus SDM teigiamo poliarumo pastoviu magnetiniu lauku, histerezės kilpa persislenka į dešinę, teigiamų magnetinio lauko stiprio verčių link (žr. 1.4 pav. b) H_{sw+} vertė padidėja, o H_{sw-} sumažėja. Tikėtina, kad šie histerezės persistūmimai nepaveikia jos pločio, nors konkretaus atsakymo į šį klausimą literatūroje rasti nepavyko.



1.4 pav. SDM histerezės kilpos padėtis veikiant pastoviu išoriniu magnetiniu lauku: a) lauko stipris -115 A/m, b) lauko stipris 115 A/m [12]

Histerezės pločio persislinkimą svarbu įvertinti parenkant žadinimo magnetinio lauko stiprį. Jei žadinimo magnetinio lauko stipris neviršys bent vienos iš slenkstinių verčių (H_{sw-} arba H_{sw+}), centrinis domenas nebus permagnetinimas, o SDM nebegeneruos impulsų, todėl negalėsime įvertinti histerezės pločio H_{sw} .

Magnetinio lauko jutikliu (pvz., holo jutikliu), histerezės plotis H_{sw} išmatuojamas taikant (1.1) lygtį, o SDM veikiantis parazitinis pastovus H_{ext} magnetinio lauko stipris taikant (1.2) lygtį [12].

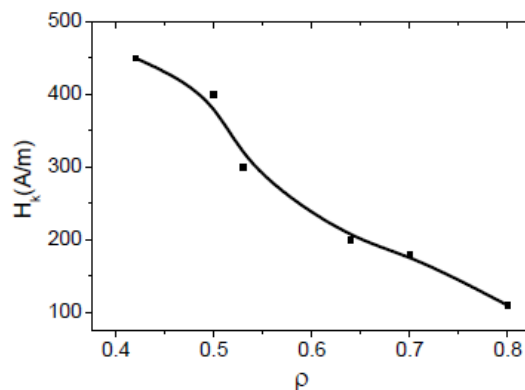
$$H_{SW} = \frac{H_{sw+} - H_{sw-}}{2}, \quad (1.1)$$

$$H_{EXT} = \frac{H_{sw+} + H_{sw-}}{2}. \quad (1.2)$$

Šios lygtys kintamuosius H_{sw} ir H_{ext} išreiškia magnetinio lauko stiprio vienetais [A/m]. H_{sw+} žymi stačiakampės histerezės kilpos teigiamą ribą, o H_{sw-} neigiamą ribą. Taikant (1.1) ir (1.2) lygtis reikia turėti omenyje, kad H_{sw+} įgauna teigiamas, o H_{sw-} neigiamas magnetinio lauko vertes. Supainiojus ženklą, H_{sw} ir H_{ext} susikeis vietomis, todėl gausime klaidingus rezultatus.

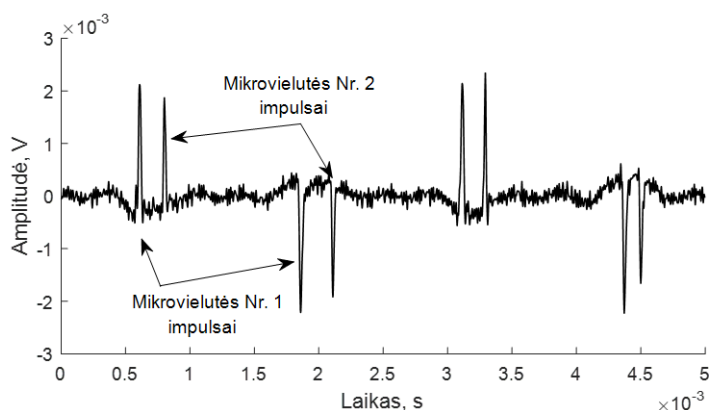
1.3.2. Mikrovielutės geometrinių charakteristikų įtaka histerezės pločiui

SDM metalinės šerdies diametras ir stiklo sluoksnio storis taip pat daro įtaka histerezės pločiui H_{sw} [4]. $Co_{67}Fe_{3.85}Ni_{1.45}B_{11.5}Si_{14.5}Mo_{1.7}$ šerdies cheminės sudėties SDM, histerezės pločio priklausomybė nuo ρ parametro pateikta 1.5 pav. ρ parametras apibrėžia metalinės šerdies diametro ir bendro diametro kartu su stiklo padengimu santykį [4]. Iš 1.5 pav. matyti, kad didėjant ρ (išlaikant tokio pat diametro metalinę šerdį ir mažinant stiklo sluoksnio storį) histerezės plotis H_{sw} mažėja. Mažėjant histerezės pločiui, mažėja ir minimalus magnetinio lauko stipris, reikalingas sužadinti SDM.



1.5 pav. ρ parametro įtaka SDM histerezės pločiui H_{sw} . Tyrime naudota $Co_{67}Fe_{3.85}Ni_{1.45}B_{11.5}Si_{14.5}Mo_{1.7}$ sudėties SDM [4]. Grafike H_{sw} žymimas H_k trumpiniu.

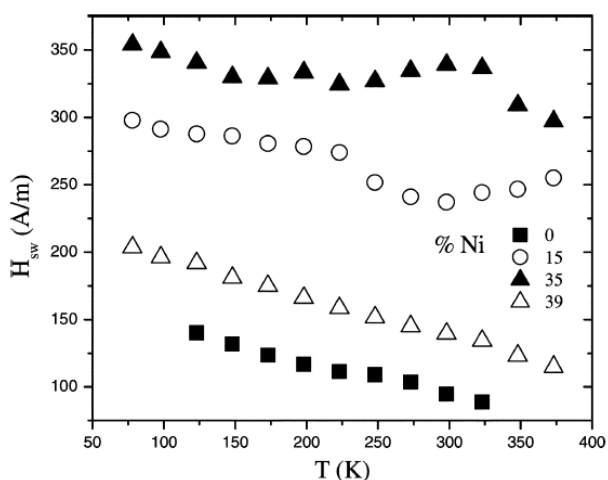
Tuo pat metu registruojant signalus iš kelių SDM, skirtingi histerezės pločiai užtikrina, kad SDM impulsai nepersidengtų laike. 1.6 pav. pateiki dvių SDM generuojami impulsai laiko srityje. Čia SDM Nr. 1 histerezės plotis yra mažesnis nei SDM Nr. 2. Histerezės pločio vien iš SDM generuojamo signalo įvertinti negalime, nes jis matuojamas atžvilgiu žadinimo signalo. Histerezės pločio įvertinimo metodika pateikiama „Metodų“ skyriuje.



1.6 pav. SDM generuojami signalai užregistruoti iš dviejų SDM tuo pat metu. SDM Nr. 1 histerezės plotis yra mažesnis nei SDM Nr. 2

1.3.3. Temperatūros ir magnetinio lauko dažnio įtaka histerezės pločiui

SDM histerezės pločio temperatūrinės charakteristikos tiesiškumas priklauso ir nuo metalo lydinio šerdies cheminės sudėties. Histerezės pločio H_{sw} temperatūrinės priklausomybės SDM turinčiose skirtingas nikelio koncentracijas pateiktos 1.7 pav. Iš 1.7 pav. matyti, kad visais atvejais histerezės plotis mažėja didėjant temperatūrai, tačiau ne visos Ni koncentracijos leidžia pasiekti tiesines temperatūrinės priklausomybes. Šis pavyzdys patvirtina, kad SDM šerdies cheminė sudėtis daro įtaką histerezės pločio temperatūrinėms charakteristikoms.

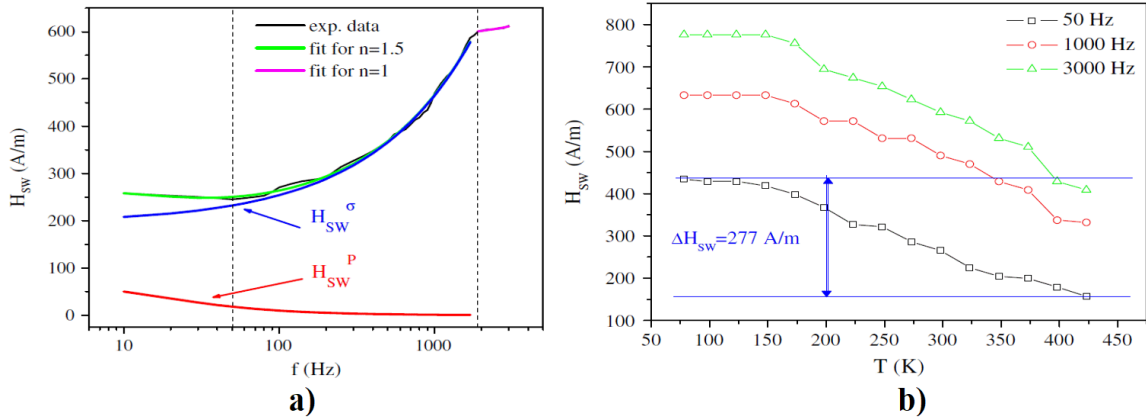


1.7 pav. Histerezės pločio H_{sw} temperatūrinės priklausomybės skirtingą Ni koncentraciją turinčiose SDM. Ni koncentracijos $x = (0\%, 15\%, 35\%$ ir $39\%)$ SDM šerdies lydinyje $Fe_{77.5-x}Ni_xMo_{7.5}B_{15}$ [9]

SDM histerezės pločio H_{sw} priklausomybė nuo žadinimo magnetinio lauko dažnio pavaizduota 1.8 pav. a) dalyje. Fizikoje histerezės pločio H_{sw} dažninė priklausomybė aiškinama remiantis relaksacinės $H_{sw}P$ ir magnetoelastinės $H_{sw}Q$ priklausomybių suma (žr. 1.8 pav.), [13].

Iš 1.8 pav. a) matyti, kad didinant žadinimo magnetinio lauko dažnį, histerezės plotis didėja. Dėl šios priežasties, siekiant gauti atsikartojančius rezultatus, histerezės pločio matavimai atliekami naudojant fiksuotą žadinimo dažnį, pvz., 400 Hz. Histerezės pločio temperatūrinės priklausomo-

mybės užregistruotos skirtingais žadinimo dažniais pateiktos 1.8 pav. b dalyje. Matyti, kad visais trimis žadinimo dažniais, histerezės plotis H_{sw} mažėja – didėjant temperatūrai. Perdavimo charakteristikos yra panašios, tačiau persislinkusios per fiksuotą nuolatinę dedamąją, kurią sukelia skirtingo dažnio magnetinio lauko naudojimas (žr. 1.8 pav. b).



1.8 pav. a) Histerezės pločio H_{sw} priklausomybė nuo žadinimo magnetinio lauko dažnio (žalia spalva) [14], b) Histerezės pločio H_{sw} temperatūrinės priklausomybės, užregistruotos žadinant SDM – 50 Hz, 1000 Hz ir 3000 Hz magnetinio lauko dažniais [14]

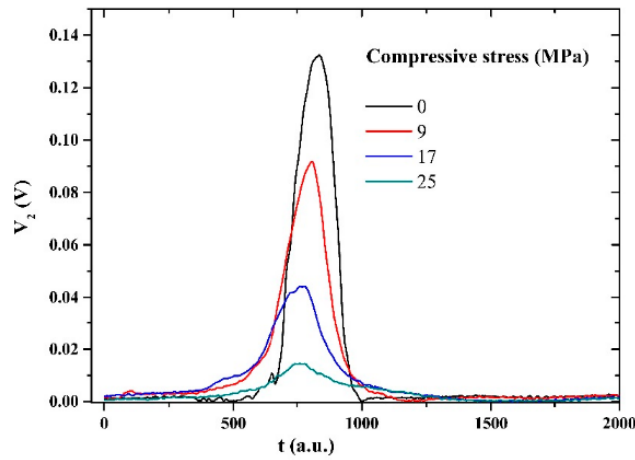
Literatūros šaltinyje [15] tirti skirtingi SDM fiksavimo tipai, priklijuojant mikrovielutę prie paviršiaus: a) viename gale, b) abiejuose galuose, c) viduryje, d) visame ilgyje. Visais minėtais atvejais siekiant įvertinti fiksavimo įtaką temperatūros matavimo rezultatams, užregistruotos ir palygintos mikrovielučiu histerezės pločio temperatūrinės charakteristikos. Tyrimo rezultatai parodė, kad tinkamiausias fiksacijos tipas, temperatūrinių matavimų metu yra SDM padengimas kljais per visą SDM ilgį. Tokiu būdu yra pasiekiamas didžiausias temperatūros matavimo jautrumas (stebimas didžiausias histerezės pločio pokytis matuojamame temperatūrų diapazone) [15].

1.3.4. Mechaninių deformacijų įtaka histerezės pločiui

Mechaninių deformacijų dydis (pvz., lenkimo metu) veikiantis SDM, įvertinamas matuojant histerezės plotį. Šaltinyje [12] deformacijų registravimo metu SDM buvo patalpinta betono cilindro viduje, lygiagrečiai jo centrinei ašiai. Eksperimento metu, bandinys buvo spaudžiamas tolygiai didėjančia mechanine jėga, tuo mat metu registruojant mechaninės jėgos dydį, SDM generuojamą signalą bei žadinimo įtampą. Histerezės plotis vertintas indukciniu metodu, priėmimo ir žadinimo rites apviniuojus aplink cilindro formos tiriamąjį bandinį. SDM žadinta sinuso formos 600 Hz srovės signalu paduotu į žadinimo ritę. Žadinimo magnetinio lauko stipris deformacijų registravimo metu buvo pastovus ir siekė 900 A/m [16].

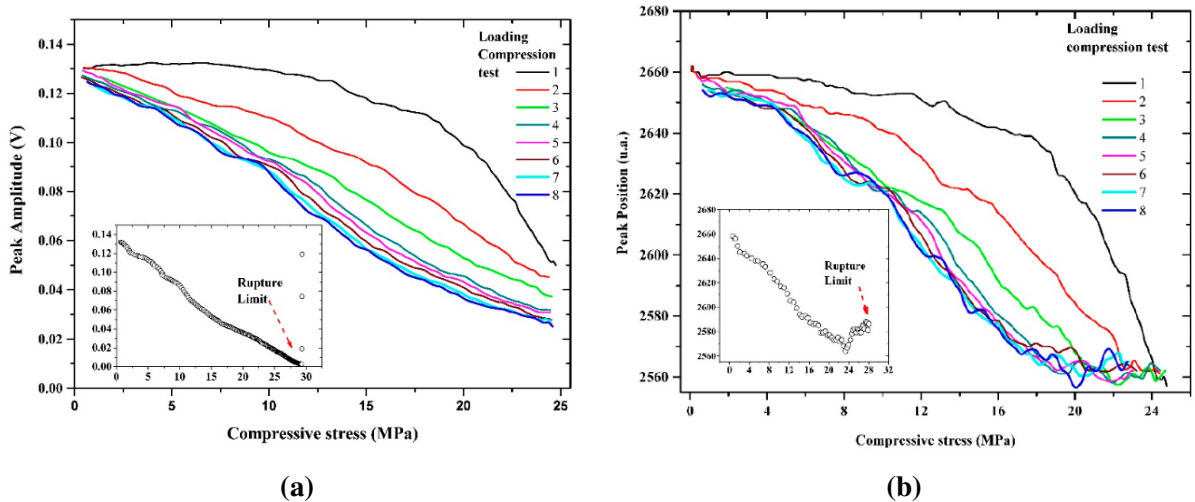
Analizuojant tyrimo rezultatus paaiškėjo, kad dėl didėjančios spaudimo jėgos, SDM teigiamas impulsas buvo sugeneruojamas anksčiau, jo amplitudė mažėjo, o plotis didėjo (žr. 1.9 pav). Bandinio deformavimo eksperimentą pakartotas 8 kartus, gauti rezultatai pateikti 1.10 pav. Vizualiai palyginus 1.10 pav. a ir b dalyse pateiktus rezultatus matyti, kad didinant spaudimo jėgą impulso amplitudės vertės (žr. 1.10 pav. a) varijuoja mažiau nei t_p intervalo vertės (žr. 1.10 pav. b).

Visgi deformacijų vertinimas vien iš SDM impulso amplitudės yra sudėtingas, dėl daugelio veiksnių, kurie gali iškraipyti amplitudę, tarp jų ir elektromagnetinio triukšmo lygis signalų registravimo aplinkoje. Mokslinėse publikacijose temperatūra ir mechaninės deformacijos dažniausiai vertinamos remiantis histerezės pločiu, o ne impulsų amplitude [1, 2, 13].



1.9 pav. Mikrovielutės teigiamo impulso formos priklausomybė nuo mikrovielutės bandinį veikiančios spaudimo jėgos [16]

Šaltinyje [16] deformacijų registravimo metu vertintas t_p intervalas, o ne histerezės plotis. Toks deformacijų vertinimas nėra korektiškas, nes nevertinama t_n intervalo įtaka, matavimo rezultatams. 1.10 pav. b dalyje pateiktose priklausomybėse matomą t_p verčių variavimą galėjo sukelti pastovaus magnetinio lauko stiprio kitimas (pvz., Žemės magnetinio lauko), nes t_p įvertis neatlieka šio poveikio kompensavimo. Kompensavimas yra atliekamas tik histerezės pločio vertinimo metu, sudedant t_p ir t_n intervalus.

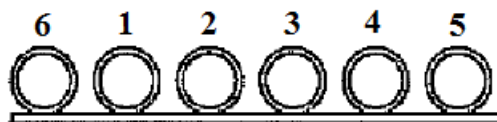


1.10 pav. Pakartotinių deformavimo eksperimentų rezultatai: a) SDM teigiamo impulso amplitudės priklausomybė nuo bandinį veikiančios spaudimo jėgos [16], b) t_p laiko intervalo priklausomybė nuo bandinį veikiančios spaudimo jėgos [16]. t_p – laiko intervalas matuotas nuo žadinimo įtampos signalo perėjimo per nulį kylančiame fronte iki teigiamo SDM impulso

1.4. Patentuoti sprendimai temperatūrai ir mechaninėms deformacijoms registruoti

Patente [17] temperatūrai matuoti taikytas jutiklių masyvas iš šešių skirtingų SDM. Keturių skirtingą Kiuri temperatūrą turinčių SDM ir dviejų indikacinių SDM skirtų impulsų sekos pradžiai ir pabaigai aptikti (žr. 1.11 pav.). Matuojamai temperatūrai viršijus SDM Kiuri temperatūros vertę, SDM praranda savo magnetines savybes ir nebegeneruoja impulsų, net jei žadinimo magnetinio lauko stipris ir yra pakankamas permagnetinti centrinį domeną. Kiuri temperatūros vertė parenkama, keičiant SDM šerdies lydinio cheminę sudėtį. Keturių SDM skirtų temperatūrai registruoti Kiuri temperatūros vertės, išdėstytos didėjančia tvarka ($T_1 < T_2 < T_3 < T_4$) matuojamame temperatūros diapazone. Dviejų indikacinių SDM Kiuri temperatūros vertės, pasirinktos aukštesnės nei maksimali temperatūra matuojamame temperatūrų diapazone. SDM generuojami signalai registruoti indukcinio metodu, pasitelkiant žadinimo ir priėmimo rites. Siekiant išvengti impulsų persidengimo signale, parinkti skirtingi SDM histerezės pločiai: $H_{sw6} < H_{sw1} < H_{sw2} < H_{sw3} < H_{sw4} < H_{sw5}$. Taip pat indikacinės SDM (Nr 5 ir Nr 6) buvo dvigubai ilgesnės nei likusios. Patente teigiama, kad ilgesnės SDM generuoja didesnės amplitudės impulsus nei trumpesnės. Ši savybė panaudota indikacinių SDM impulsams išskirti.

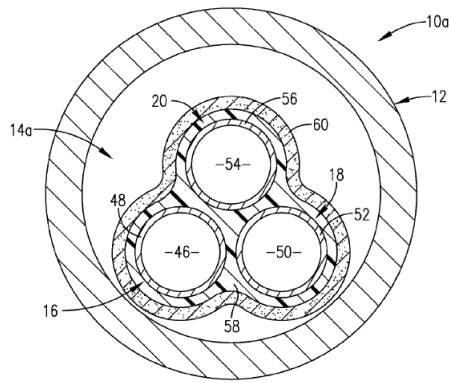
Indikacinių vielučių impulsai leidžia lengviau nustatyti impulsų sekos pradžią ir pabaigą. Temperatūra įvertinama iš generuojamos impulsų sekos, nustatant kurie temperatūrai matuoti skirtų SDM impulsai yra praleisti. Pavyzdžiui: jei temperatūra aukštesnė nei T_2 , bet žemesnė nei T_3 , nematysime Nr1 ir Nr2 SDM impulsų, bet matysime Nr3 ir Nr4 impulsus.



1.11 pav. SDM išdėstymas temperatūros matavimo metu. 1–4 temperatūros matavimo SDM, 5–6 indikacinės SDM [17]

Kitame patente [18] temperatūrai matuoti taikytos trys SDM: temperatūros jutimo, atraminė ir kalibracinė (žr. 1.12 pav). Šios SDM suklijuotos tarpusavyje temperatūrai atspariais, lanksčiais klijais. Gauta struktūra padengta sausu tepalu ir patalpinama apsauginėje kapsulėje. Kapsulėje SDM struktūra nėra įtvirtinta ir gali judėti laisvai. Teigiama, kad kapsulė apsaugo SDM nuo mechaninių pažeidimų, o neįtvirtinimas joje – apsaugo SDM nuo įtempimų susidarančių keičiantis kapsulės matmenims (pvz., deformacijų metu). Aiškinama, kad tinkamos medžiagos kapsulės gamybai yra paramagnetikai, metalo lydiniai turintys artimą nuliui įmagnetinimą, stiklo audiniai, keramika, sintetinės dervos polimerai. Teigiama, kad tinkamiausia medžiaga kapsulės gamybai yra nitilono metalo lydiniai (NiTi).

SDM signalai registruoti indukcinio metodu, žadinimo ir priėmimo ritėmis. Temperatūrai vertinti pasitelktas, temperatūros matavimo SDM generuojamo impulso plotas. Patente teigiama, kad didėjant temperatūrai, impulso ribojamas plotas palaipsniui mažėja. O atraminės SDM impulso ribojamas plotas yra pastovus ir nepriklauso nuo temperatūros, matuojamame temperatūrų diapazone. Problema ta, kad keičiantis priėmimo ritės atstumui nuo SDM, plotai po atraminės ir



1.12 pav. Temperatūros registravimo jutiklio paremto SDM sandara. 16 – temperatūros jutimo SDM, 18 – atraminė SDM, 20 – kalibracinė SDM. 58 – lankstūs temperatūrai atsparūs klijai, 60 – sausas tepalas (angl. *drylubricant*), 12 – apsauginė kapsulė [18]

temperatūros jutimo vielutės generuojamais impulsais keičiasi. Dėl to atraminės SDM impulso ribojamas plotas, pasitelktas priėmimo ritės atstumo kitimui kompensuoti. Prieš atliekant realius temperatūros matavimus yra atliekama kalibravimo procedūra, kurios metu užregistruojami temperatūros jutimo ir atraminės SDM impulsų ribojami plotai prie skirtingų priėmimo ritės padėčių ir temperatūrų. Kalibravimo metu surinkta informacija panaudojama perskaičiuoti išmatuotus jutimo ir atraminės vielutės impulso plotus į realias temperatūros vertes.

Kalibracinė SDM taikyta temperatūros matavimams patikslinti. Kalibracinės SDM Kiuri temperatūra parenkama taip, kad ji patektų į matuojamą temperatūrų diapazoną. Viršijus kalibracinės SDM Kiuri temperatūros vertę ji nebegeneruoja impulsų, tokiu būdu pranešant, apie pasiektą temperatūros vertę. Kalibracinė SDM gali veikti ir kaip papildoma temperatūros jutimo vielutė, veikdama žemesnėje temperatūroje nei jos Kiuri temperatūros vertė. Visgi, šiame patente nieko neužsimenama apie žadinimo magnetinio lauko stiprio įtaką SDM impulsų plotams ir matavimo rezultatams.

1.5. Skyriaus apibendrinimas

1. Stiklu dengtos mikrovielutės histerezės plotis leidžia vertinti mikrovielutę veikiančių deformacijų ar temperatūros dydį.
2. Stiklu dengtos mikrovielutės geometrinės charakteristikos (ilgis, šerdies diametras, stiklo sluoksnio storis) ir metalo lydinio cheminė kompozicija nusako mikrovielutės magnetines savybes [19], kurios iš esmės apsprendžia mikrovielutės histerezės pločio reakciją į ją veikiančius faktorius (pvz., temperatūrą ar deformacijas). Dėl to mikrovielutės parametrų parinkimas yra ypač atsakinga dalis, nulemianti gaunamus matavimo rezultatus.
3. Analizuojant literatūrą nerasta metodų leidžiančių išmatuoti histerezės plotį automatiškai. Taip pat, nerasta skaitmeninių signalų apdorojimo metodų leidžiančių išskirti mikrovielutės signalą iš atsako signalo.

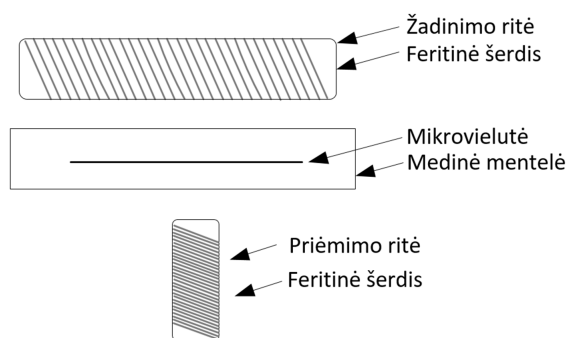
2. Metodai

Šiame skyriuje pateikiama informacija susijusi su tyrimų eksperimentine įranga ir tyrimų metodika. Taip pat aprašomi mikrovielučių signalo apdorojimo etapai, pateikiami histerezės pločio įvertinimo principai.

2.1. Eksperimentinė įranga

Temperatūros ir deformavimo eksperimentų metu SDM generuojamas signalas registruotas indukcinio metodu, naudojant žadinimo ir priėmimo rites (žr. 2.1 pav.). Žadinimo ritė reikalinga išoriniam kintančiam magnetiniam laukui sukurti, o priėmimo ritė – atsako signalui registruoti. Tyrimų metu SDM žadinta 400 Hz kosinuso dėsnio kintančiu magnetiniu lauku. Tiekiant periodinį (sinuso, kosinuso ar trikampio formos dėsnio kintantį) srovės signalą į žadinimo ritę yra sukuriamas išorinis kintantis magnetinis laukas, gebantis periodiškai permagnetinti SDM [1, 16].

SDM veikiantis magnetinis laukas visame mikrovielutės ilgyje turi išlikti tolygus (angl. *homogeneous*), todėl žadinimo ritės sukuriamo magnetinio lauko pasiskirstymas yra svarbus [8, 20]. Siekiant parinkti tinkamiausią žadinimo ritę, tyrimų metu ekperimentuota su skirtingos formos žadinimo ritėmis. Vertintos trijų formų žadinimo ritės: solenoido, U ir kūgio formos. Solenoido ir U formos žadinimo ritės sukuria tolygų magnetinį lauką aplink savo centrinę ašį, todėl jos žadinimo metu orientuotos lygiagrečiai SDM bandiniui (žr. 2.1 pav.). Kūgio formos ritė sukuria tolygų magnetinį lauką virš kūgio pagrindo, todėl SDM žadinimo metu laikyta virš šios dalies. Ričių sukuriamo magnetinio lauko modeliavimo rezultatai pateikti rezultatų skiltyje.



2.1 pav. SDM signalo registravimo schema, taikant solenoido tipo žadinimo ritę

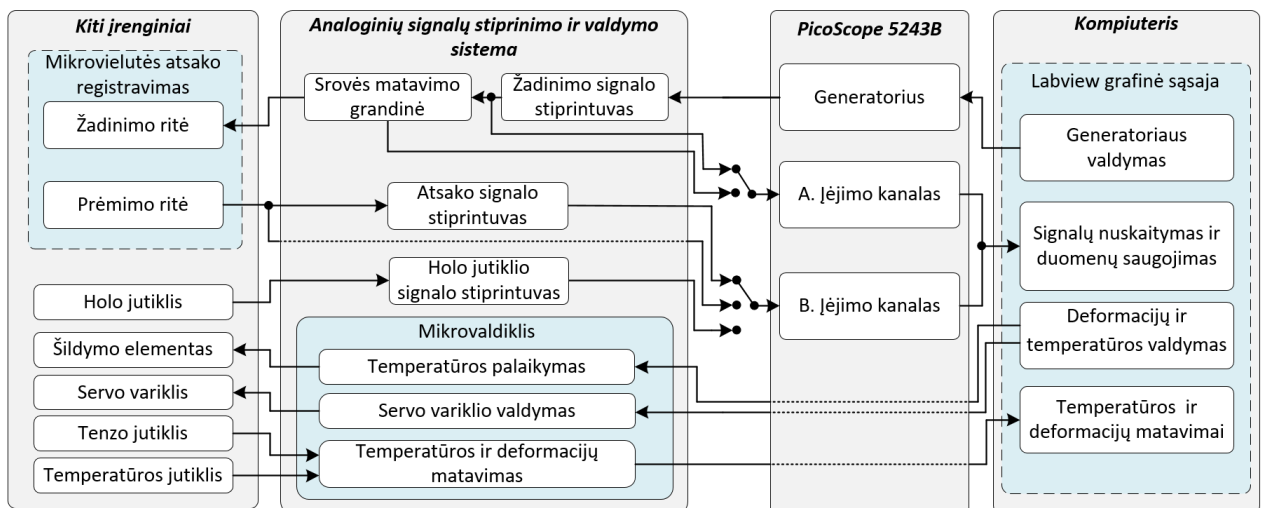
Žadinimo ir priėmimo signalai registruoti sinchroniškai oscilografu Picoscope 4000 (Pico Technology, JK), 14 bitų skiriamąja geba ir 44.1 MHz diskretizavimo dažniu. Temperatūros ar deformacijų poveikio sukeltas histerezės pločio pokytis yra santykinai nedidelis (10–100 μ s), todėl siekiant užtikrinti didelį laikinį skiriamumą, pasirinktas aukštas diskretizavimo dažnis.

Žadinant SDM, priėmimo ritėje registruojamas atsako signalas susideda iš žadinimo signalo dedamosios, triukšmo ir SDM signalo. Žadinimo signalo dedamosios amplitudė atsako signale yra daug didesnė nei SDM generuojamo signalo. Dėl to registravimo metu priėmimo ritė orientuota statmenai žadinimo ritei, taip siekiant sumažinti žadinimo signalo dedamosios amplitudę atsako signale. Priėmimo ritei tostant nuo SDM, ritėje registruojama SDM impulso amplitudė mažėja,

kol tampa nebeiškiriama iš triukšmo signalo. Dėl to registravimo metu stengtasi priėmimo ritę laikyti kuo arčiau SDM, taip siekiant gauti kuo didesnį signalo ir triukšmo santykį.

Impulsinių šaltinių sukeltus triukšmus ypač sunku pašalinti iš užregistruoto atsako signalo. Dėl to tyrimų metu iš signalų registravimo aplinkos stengtasi pašalinti impulsinį triukšmą skleidžiančius šaltinius (pvz., impulsinius maitinimo šaltinius, įrenginius naudojančius USB sąsajas, tranzistorius dirbančius rakto režimu ir t.t.). Tokiu būdu mažinant triukšmo šaltinių skaičių ir didinant užregistruoto atsako signalo STS (signalas-triukšmas santykį).

2.2 pav. pateikta eksperimentinės įrangos struktūra. Matavimo sistemos valdymas atliekamas „Labview“ grafinėje sąsajoje. Sąsajoje pasirenkami pradiniai tyrimo nustatymai, atliekamas duomenų nuskaitymas iš periferinių įrenginių bei atvaizduojami signalai. Taip pat sąsaja atlieka duomenų saugojimo funkciją. „Picoscope“ įrenginys taikytas SDM žadinimo ir atsako signalams registruoti, o analoginių signalų stiprinimo sistema – žadinimo, atsako ir magnetinio lauko jutiklio signalams stiprinti bei išoriniams įrenginiams valdyti.



2.2 pav. Tyrimų įrangos struktūra

2.1.1. Temperatūrinio poveikio tyrimo stendas

Siekiant ištirti SDM reakciją į temperatūrą, buvo suprojektuotas ir pagamintas temperatūrinio poveikio stendas (žr. 2 priedą). SDM tikimasi taikyti medicinoje stebint temperatūrą pooperaciniu laikotarpiu ir vertinant organizmo reakciją į implantą. Dėl to tyrimo metu SDM reakcija tirta santykinai siaurame (25–45 °C) temperatūrų diapazone. Stendo korpusas atspausdintas 3D spausdintuvu iš PLA (angl. *polylactide*) plastiko.

Temperatūrinio stendo viduje integruotas plokščias šildymo elementas skleidžiantis šilumą ir termopora registruojanti SDM veikiančią temperatūrą. Termoporos temperatūros matavimai laikyti atraminiais ir lyginti su SDM histerezės pločio matavimais. Ertmė esanti tarp SDM ir šildymo elemento plokštumos užpildyta druska, toks užpildas leidžia tolygiai paskirstyti šilumą nuo šildymo elemento, SDM link. Šildymo elemento temperatūra reguliuota mikrovaldikliu, pagal vartotojo pa-

sirinktus nustatymus (temperatūros kitimo greitį, diapazoną) „Labview“ grafinio vartotojo sąsajoje (žr. 1 priedą).

Temperatūrinių tyrimų metu SDM žadinta kintančiu magnetiniu lauku, kurį sukuria kūgio formos žadinimo rite. Stendas kartu su SDM ir priėmimo rite pritvirtintas virš žadinimo ritės taip, kad mikrovielutė būtų veikiamą tolygaus magnetinio lauko. Priėmimo ritė tvirtina virš temperatūrinio stendo, slankikliuose. Atsako signalo registravimą galima atlikti ir priėmimo ritę integruota kūgio formos žadinimo ritės korpuse, tačiau tokiu atveju negalime keisti priėmimo ritės pozicijos atžvilgiu SDM ir tirti pozicijos įtakos registruojamam atsako signalui.

Temperatūrinio stendo funkcinės savybės:

- temperatūros ribos: 20–45 °C;
- temperatūros keitimo žingsnis: 1 °C / 2 min;
- temperatūros jutiklio (termoporos) paklaida pagal specifikaciją: ± 1 °C.

2.1.2. Mechaninio poveikio tyrimo stendas

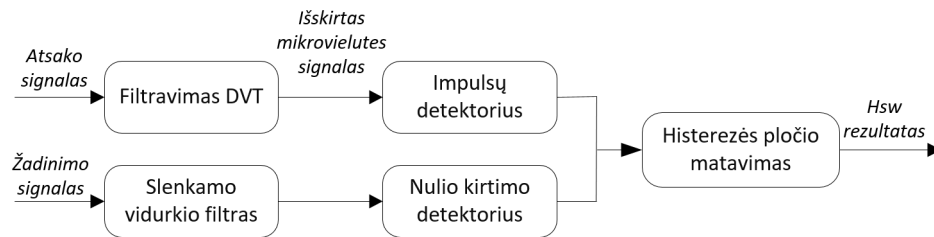
Siekiant įvertinti mechaninių deformacijų poveikį SDM histerezės pločiui ir signalo morfologijai, suprojektuotas ir pagamintas mechaninio poveikio stendas (žr. 3 priedą). Pagrindiniai stendo elementai yra servo variklis ir stūmoklis perduodantis jėgą į SDM. Tyrimo metu SDM tvirtinta prie medinės mentelės greitai stingstančiais klėjais, padengiant ją visame ilgyje, pagal [15] šaltinyje pateiktas rekomendacijas. Deformacijų dydis veikiantis medinę plokštelę reguliuotas keičiant stūmoklio eigą. Stūmokliui slenkant žemyn medinė plokštelė išlenkiama, tokiu būdu sukeliama deformacijos SDM. Stūmoklio eiga matuota mikrometru pritvirtintu virš stūmoklio. SDM veikiantis deformacijų dydis vertintas tenzo jutikliu priklijuotu kitoje medinės plokštelės pusėje. Tenzo jutikliu įvertintas deformacijų dydis laikytas atraminiu ir lygintas su SDM magnetinės histerezės pločiu. Dėl didelių matmenų atsisakyta kūgio formos ritės, todėl tyrimo metu SDM žadinta U formos žadinimo rite. Žadinimo ritė orientuota lygiagrečiai, o priėmimo – statmenai mikrovielutei.

Deformavimo stendo funkcijos savybės:

- stūmoklio eigos ribos: 0–7 mm;
- stūmoklio eigos žingsnis: ~ 0.1 mm;
- mikrometro skiriamoji geba: 0.01 mm;
- tenzo jutiklio skiriamoji geba: 24 bitai.

2.2. Histerezės pločio įvertinimo algoritmas

Bendra atsako ir žadinimo signalo apdorojimo seka, atliekama prieš histerezės pločio matavimą pateikta 2.3 pav. Filtruojant atsako signalą DVT yra išskiriamas SDM signalas, o pritaikius impulsų detektorių nustatomos SDM impulsų pozicijos signale. Žadinimo signalą filtruojant slenkamo vidurkio filtru nuslopinami aukšto dažnio triukšmai ir padidinamas STS, o pritaikius nulio kirtimo detektorių, nustatomos nulio kirtimo pozicijos signale. Histerezės pločio matavimo dalyje iš SDM impulsų pozicijų ir perėjimų per nulį žadinimo signale yra apskaičiuojamas histerezės plotis. Išsamus kiekvienos algoritmo dalies aprašymas pateiktas tolimesniuose skyriuose.



2.3 pav. Histerezės pločio įvertinimo algoritmo struktūrinė schema

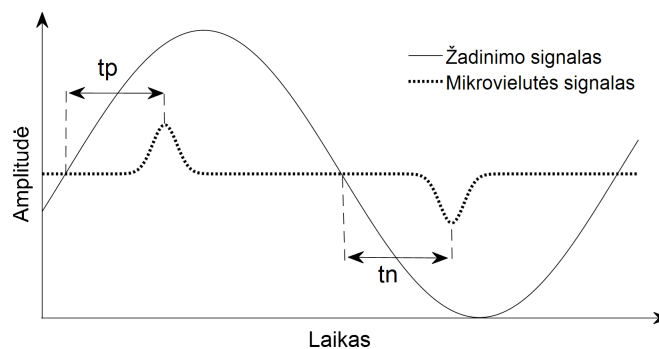
Histerezės plotis H_{sw} laiko srityje įvertinamas iš sinchroniškai užregistruotų žadinimo (srovės ar įtampos) bei SDM signalų (žr. 2.4 pav.). Histerezės plotis H_{sw} laiko srityje apskaičiuojamas (2.1) lygtimi [1]:

$$H_{sw} = t_p + t_n. \quad (2.1)$$

Nuolatinio magnetinio lauko (pvz., Žemės magnetinio lauko) sukeltas histerezės kilpos persislinkimas H_{ext} laiko srityje įvertinamas:

$$H_{ext} = t_p - t_n, \quad (2.2)$$

čia t_p – laiko intervalas nuo žadinimo signalo perėjimo per nulį, kylančiame fronte iki teigiamo SDM impulso (žr. 2.4 pav.), t_n – laiko intervalas nuo žadinimo signalo perėjimo per nulį krintančiame fronte iki neigiamo SDM impulso (žr. 2.4 pav.).



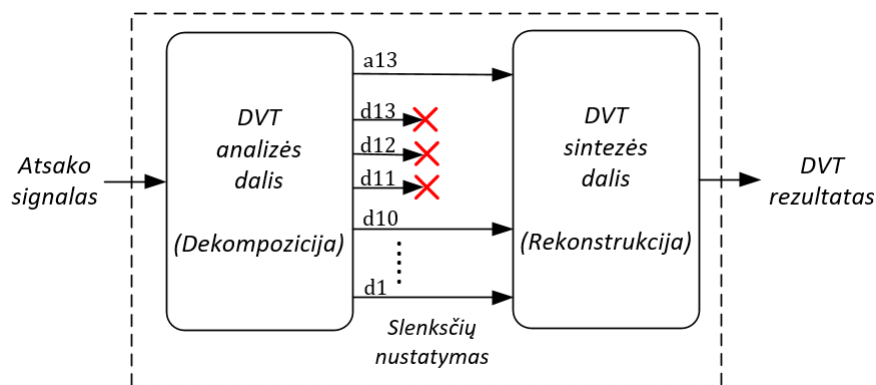
2.4 pav. SDM histerezės pločio H_{sw} įvertinimo principas, remiantis žadinimo ir mikrovielutės signalais

2.3. Mikrovielutės signalo išskyrimo metodas

Priėmimo ritėje užregistruotas atsako signalas susideda iš žadinimo signalo dedamosios, SDM signalo ir triukšmo. Žadinimo signalo dedamosios amplitudė yra daug didesnė nei SDM signalo, todėl ją būtina pašalinti norint išskirti SDM signalą. Taip pat būtina pašalinti ir triukšmą, nes vertinant histerezės plotį, svarbu kuo tiksliau nustatyti SDM impulsų pozicijas signale.

Šiame darbe SDM signalo išskyrimas įgyvendintas dviem etapais. Pirmame etape taikant diskretinę vilnelių transformaciją (DVT) iš atsako signalo išskiriama žadinimo signalo dedamoji bei triukšmas. Antrame etape gauti signalai yra atimami iš atsako signalo, taip išskiriant SDM signalą.

Diskretinę vilnelių transformaciją sudaro trys pagrindinės dalys: signalo dekompozicija, slenksčių nustatymo dalis ir signalo rekonstrukcija (žr. 2.5 pav.). Signalų dekompozicijos dalyje, atsako signalas yra išskaidomas į komponentes nešančias skirtingo dažnio informaciją [21, 22]. Dekompozicijos komponentių skaičius priklauso nuo lygių skaičiaus (angl. *decomposition level*). Nustačius dekompozicijos lygių skaičių į 13, DVT iš viso sugeneruos 14 komponentių: nuo $d1$ iki $d13$ ir $a13$ (žr. 2.5).

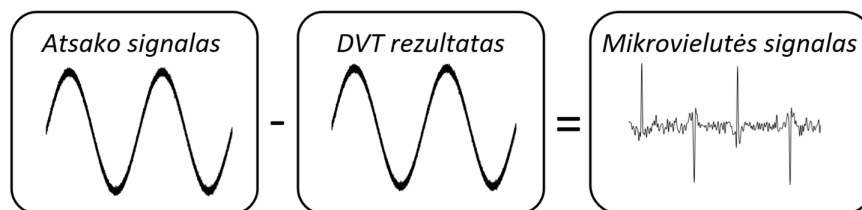


2.5 pav. Žadinimo ir triukšmo komponentių išskyrimas iš atsako signalo taikant DVT. Raudonai pažymėtoms komponentėms taikytas aukštas slenkstis, todėl jos nebuvo paduotos į rekonstrukcijos dalį. Pav. adaptuotas iš [22, 23]

Komponentė $a13$ apibūdina žadinimo signalo dedamąją atsako signale, o likusios komponentės nuo $d1$ iki $d13$ apibūdina triukšmą ir mikrovielutės signalą. Kuo aukštesnis komponentės numeris tuo žemesnio dažnio signalą ji atvaizduoja. Pavyzdžiui: $d1$ komponentė atvaizduoja aukščiausio dažnio informaciją esančią atsako signale, o $d13$ - žemesnio. Slenksčio parinkimo dalyje, nulinio slenksčiai buvo nustatyti komponentėms, kurios nešė triukšmo ir žadinimo signalo dedamųjų informaciją. O aukšti slenksčiai (aukštesni nei komponentės amplitudė) nustatyti komponentėms, nešančioms mikrovielutės signalo informaciją.

Komponentės, kurioms buvo nustatytas nulinis slenkstis buvo paduotos į sintezės dalį ir išliks rekonstruotame signale, o komponentės turėjusios aukštą slenkstį, nepateks į sintezės dalį ir bus pašalintos iš rekonstruoto signalo (žr. 2.5). Atlikus šiuos veiksmus, rekonstruotame signale išlieka visos komponentės, išskyrus komponentes nešančias SDM signalo informaciją.

Galiausiai iš atsako signalo atėmus rekonstruotą signalą (DVT rezultatą) yra išskiriamas SDM signalas (žr. 2.6 pav.).



2.6 pav. Mikrovielutės signalo išskyrimas iš atsako signalo taikant DVT

2.4. Atsako ir žadinimo signalo modeliavimas

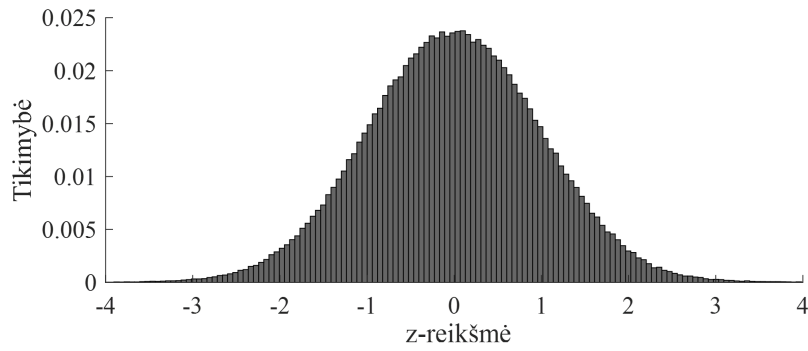
Siekiant surasti optimalius DVT parametrus (vilnelės tipą, dekompozicijos lygių skaičių (angl. *decomposition level*), triukšmo šalinimo slenksčius (angl. *denoising thresholds*)), kurie leistų kuo tiksliau išskirti SDM signalą iš atsako signalo, pasitektas signalo modeliavimas. Modeliuoti atsako signalai buvo filtruojami taikant skirtingus DVT parametrus. Po filtravimo išskirtas SDM signalas buvo lyginamas su modeliuotu mikrovielutės signalu taikant vidutinės kvadratinės klaidos įvertį (angl. *mean square error*):

$$VKK = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (2.3)$$

čia N – atskaitų skaičius signale, i – dabartinės atskaitos numeris, y_i – modeliuoto SDM signalo atskaita, \hat{y}_i – filtruoto SDM signalo atskaita. Priėmimo ritėje registruojamas atsako signalas, modeliuotas taikant adityvinį (angl. *additive*) signalo modelį: sudedant žadinimo, SDM ir triukšmo signalus. SDM generuojamo impulso forma sugeneruota naudojant Gauso tikimybės tankio funkciją (žr. 2.4). Kintamojo σ vertė apibrėžia mikrovielutės impulso plotį, o μ kintamasis nėra naudojamas ir yra lygus nuliui. Kintamasis x buvo keičiamas nuo -4 iki 4, žingsniu 0.01:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}. \quad (2.4)$$

SDM signalas sugeneruotas įterpiant nulines atskaitas tarp sugeneruotų teigiamų ir neigiamų impulsų. Impulso amplitudė ir plotis modeliuotame SDM signale buvo pastovūs ir siekė 5 mV ir 100 μ s. Modeliuotą žadinimo signalo dedamąją sudarė 400 Hz sinuso formos signalas. Realiame atsako signale, triukšmo vertės pasiskirsčiusios pagal skirstinį, kurio eksceso koef. yra 0.23, o asimetrijos koef. lygus 0.01 (žr. 2.7 pav.). Kadangi eksceso koeficientas artimas nuliui, o skirstinys yra simetriškas priimame, kad tai normalusis (Gauso) skirstinys. Dėl to modeliuotame atsako signale triukšmo signalas sugeneruotas iš atsitiktinių verčių pasiskirsčiusių pagal normalųjį skirstinį, apibrėžtą parametrais $\mu = 0$, $\sigma = 1$. Modeliuoti signalai diskretizuoti tokiu pat dažniu kaip ir realūs signalai 44.1 MHz.



2.7 pav. Standartizuotas triukšmo skirstinys, realiame atsako signale, pašalinus žadinimo signalo dedamąją. Eksceso koef. = 0.23; Asimetrijos koef. = 0.01

Triukšmo signalo lygis modeliuotame signale apibrėžtas STS_1 parametru ir išmatuotas tarp sugeneruoto SDM ir triukšmo signalo:

$$STS_1 = 20 \cdot \log_{10} \frac{RMS_{mikrovielutes}}{RMS_{triuksmo}}. \quad (2.5)$$

Žadinimo signalo dedamosios lygis modeliuotame atsako signale apibrėžtas STS_2 parametru ir išmatuotas tarp SDM ir žadinimo dedamosios (sinuso) signalo:

$$STS_2 = 20 \cdot \log_{10} \frac{RMS_{mikrovielutes}}{RMS_{sinuso}}. \quad (2.6)$$

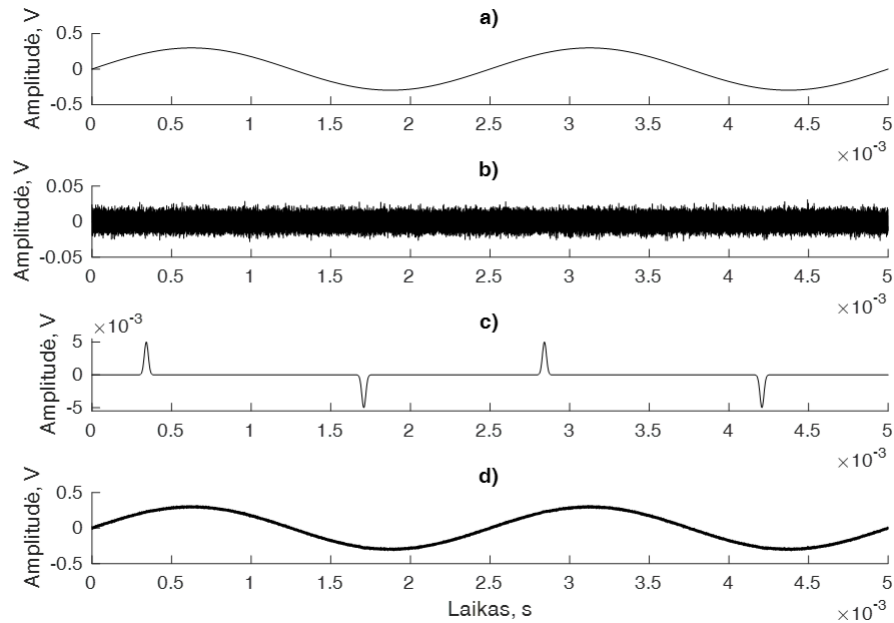
RMS vertė (2.5) ir (2.6) lygtyse apskaičiuota remiantis šia išraiška:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x(n)|^2}, \quad (2.7)$$

čia $x(n)$ signalo n -oji atskaita, N - atskaitų skaičius signale. SDM signalo amplitudė modeliuotame atsako signale buvo pastovi, o triukšmo ir žadinimo signalo dedamosios amplitudės buvo keičiamos, pagal norimus STS_1 ir STS_2 parametrus. Pavyzdžiui: $STS_1 = -20$ dB ir $STS_2 = -50$ dB. Pirmiausia žadinimo dedamosios (sinuso) ir triukšmo signalai yra normalizuojami, padalinant signalo atskaitas iš signalo RMS vertės. Po normalizavimo signalų RMS tampa lygus vienam. Kitame žingsnyje žinant norimus atsako signalo parametrus STS_1 ir STS_2 iš (2.5) ir (2.6) lygčių išsireiškiame kintamuosius $RMS_{excitation}$ ir RMS_{noise} . Išreikštas kintamųjų vertes padauginame atitinkamai iš normuotų triukšmo ir žadinimo signalo dedamųjų taip suteikiant joms amplitudes pagal norimus STS_1 ir STS_2 parametrus. Bendrai šiuos veiksmus galima išreikšti (2.8) lygtimi:

$$X(n) = X_{norm}(n) \cdot \frac{RMS_{viel}}{10^{\frac{STS_1}{20}}}, \quad (2.8)$$

čia $X_{norm}(n)$ - normuoto triukšmo signalo atskaita, RMS_{viel} - SDM signalo RMS vertė, $X(n)$ - triukšmo signalas atitinkantis STS_1 lygį atžvilgiu vielutės signalo. Tokiu pačiu principu perskaičiuojama ir žadinimo komponentės amplitudė pagal STS_2 lygį. Sumodeliuotas atsako signalas ir jį sudarančios komponentės pateiktos 2.8 pav.



2.8 pav. Atsako signalo modeliavimo principas: a) žadinimo signalo dedamoji, b) triukšmo dedamoji, c) SDM signalas ir d) kompozitinis atsako signalas. Modeliuoto atsako signalo parametrai $STS_1 = -20$ dB, $STS_2 = -50$ dB

Atlikus atsako signalo modeliavimą, pereita prie žadinimo signalo modeliavimo, nes norint įvertinti histerezės plotį būtina turėti žadinimo ir atsako signalus. Žadinimo signalas sugeneruotas sudedant sinuso ir triukšmo signalus. Viena dalis žadinimo signalų generuoti naudojant Gauso, o kita Laplaso skirstiniu pasiskirsčiusias triukšmo vertes. Taip siekiant ištestuoti nulių kirtimų detektoriaus veikimą esant skirtingo tipo triukšmams. Triukšmo lygis modeliuotame žadinimo signalo apibrėžtas STS_3 įverčiu:

$$STS_3 = 20 \cdot \log_{10} \frac{RMS_{sinuso}}{RMS_{triuksmo}}. \quad (2.9)$$

Laplaso triukšmas generuotas pagal (2.10) lygtį, o Gauso triukšmas – pagal (2.11) lygtį:

$$Laplaso = \mu - \frac{\sigma}{\sqrt{2}} \cdot sign(U_t) \cdot \ln(1 - |U_t|), \quad (2.10)$$

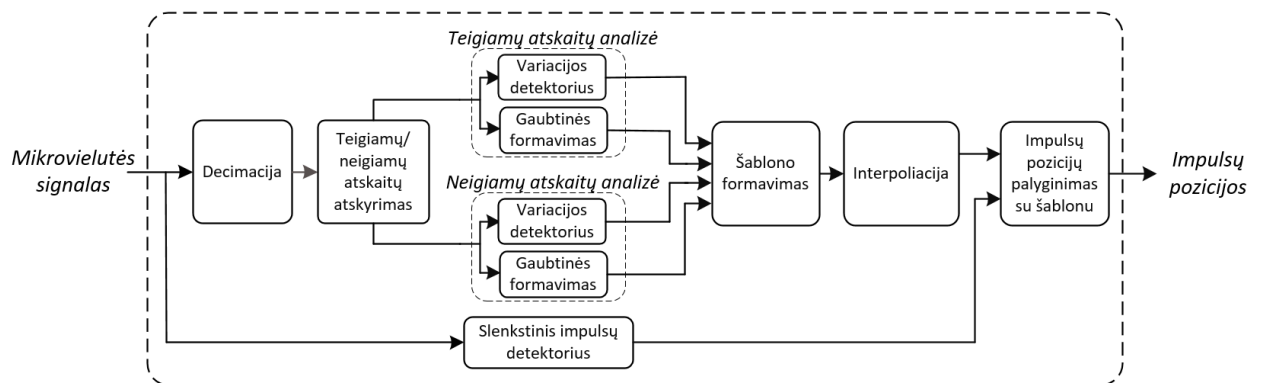
$$Gauso = \sigma \cdot U_n + \mu, \quad (2.11)$$

čia U_t - atsitiktinės atskaitos, įgaunančios amplitudes intervale nuo -0.5 iki 0.5 bei pasiskirsčiusios pagal tolygųjį skirstinį, σ - skirstinio standartinis nuokrypis, μ - vidurkis. U_n - atsitiktinės vertės, pasiskirsčiusios pagal normalųjį skirstinį.

2.5. Mikrovielutės generuojamų impulsų detektorius

SDM impulsų detektoriaus struktūra pateikta 2.9 pav. Pirmiausia išskirtas SDM signalas yra decimuojamas 400 kartų, taip sumažinant atskaitų skaičių signale. Decimuojant antisanklotinis žemo dažnio filtras nėra naudojamas, nes 44.1 MHz diskretizavimo dažniui suprojektuotas žemų dažnių filtras turėtų labai daug koeficientų, o skaičiavimo sąnaudos būtų pernelyg didelės. Po decimacijos atskaitų skaičius signale sumažinamas nuo 510835 iki 1277 atskaitų. Kitame etape į du signalus yra atskiriamos teigiamos ir neigiamos signalo atskaitos. Po atskyrimo, signalai normalizuojami, padalinant signalo vertes iš maksimalios signale esančios amplitudės. Po normalizavimo pereinama prie teigiamų ir neigiamų atskaitų analizės. Neigiamų atskaitų signalas prieš analizę yra invertuojamas.

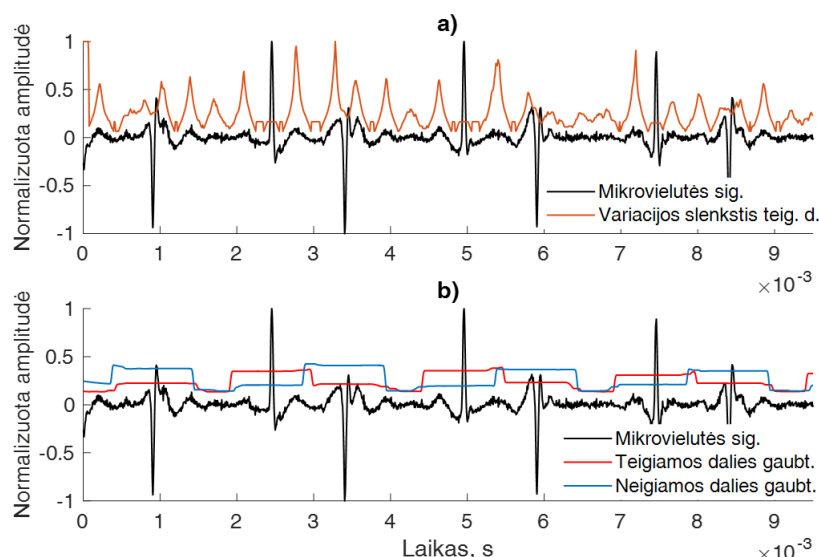
Normalizuotuose signaluose, 16 atskaitų slenkančiame lange skaičiuojama variacija, o 110 atskaitų slenkančiame lange – RMS gaubtinė. Prieš skaičiuojant variaciją, standartinio nuokrypio ir vidurkio signalai normalizuojami pagal maksimalias amplitudės vertes. Variacijos signalas gaunamas padalinant apskaičiuotą vidurkio signalą iš standartinio nuokrypio signalo. Tai atlikus, gautas variacijos signalas, taip pat normalizuojamas pagal maksimalia amplitudę. Pabaigoje, gaubtinės ir variacijos signalai interpoliuojami, taip jiems suteikiant realų diskretizavimo dažnį, 44.1 MHz.



2.9 pav. Impulsų detektoriaus struktūra

Orientacinės SDM impulsų pozicijos yra aptinkamos pritaikius slenkstinį detektorių nedecimuotam SDM signalui. Aptiktos impulsų pozicijos yra lyginamos su variacijos detektoriaus slenksčio vertėmis. Jei variacijos slenkstis kerta SDM sugeneruoto impulso atskaitas, priimama, kad toje srityje yra impulsas, jei ne – impulsas atmetamas. Iš 2.10 pav. a) dalies matyti, kad variacijos slenkstis, leistų aptiktų teigiamus impulsus, tačiau taip pat aptiktų ir neigiamų impulsų artefaktus, teigiamoje signalo dalyje (pvz., ties 0.9 ms), (žr. 2.10 pav. a).

Klaidingiems impulsams pašalinti yra lyginamos teigiamos ir neigiamos signalo dalies gaubtinių vertės. Jei teigiamo impulso pozicijoje, teigiamos dalies gaubtinės vertė įgauna didesnę vertę nei neigiamos, vadinasi tai teigiamas impulsas, jei ne – neigiamas (žr. 2.10 pav. b). Jei ieškant teigiamų impulsų gaubtinių palyginimas parodo, kad tai neigiamas impulsas, reiškia tai yra neigiamo impulso sukeltas artefaktas.



2.10 pav. Impulsų detektoriaus veikimas. a) variacijos slenkstis teigiamiems impulsams, b) teigiamos ir neigiamos signalo dalies gaubtinė. Gaubtinių ir variacijos signalai atvaizduoti po interpoliacijos

Impulsų detektoriaus veikimas kiekybiškai įvertintas jautrumo, teigiamos prognostinės vertės ir diagnostinio tikslumo parametrais:

$$Jautrumas = \frac{TT}{TT + KN}, \quad (2.12)$$

$$Teigiama\ prognostine\ verte = \frac{TT}{TT + KT}, \quad (2.13)$$

$$Diagnostinis\ tikslumas = \frac{TT}{TT + KN + KT}, \quad (2.14)$$

čia TT – teisingai atpažintų impulsų skaičius, KN – neatpažintų impulsų skaičius, KT – klaidingai atpažintų impulsų skaičius.

2.6. Nulio kirtimo detektorius

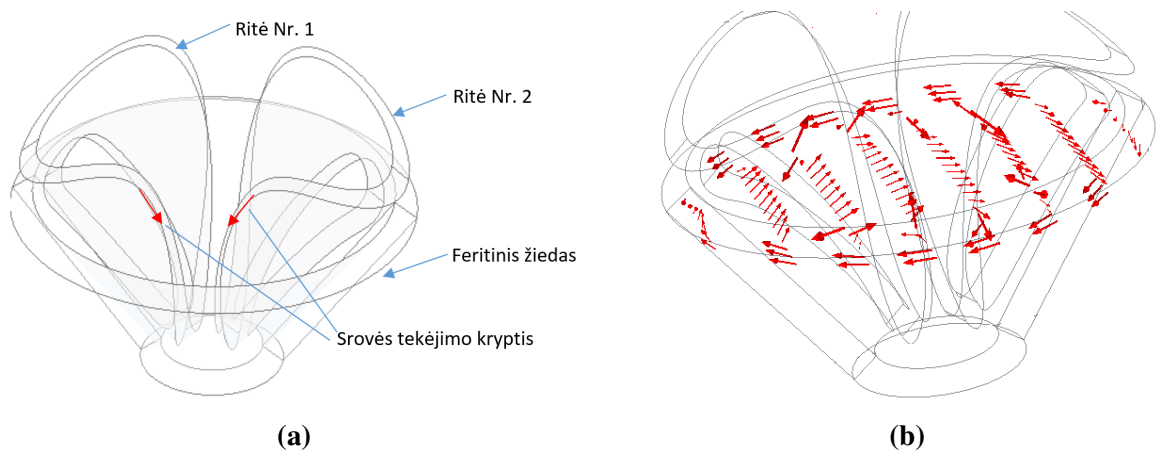
Pagrindiniai reikalavimai keliami nulio kirtimo detektoriumi yra aukštas nulio kirtimo pozicijos nustatymo tikslumas ir mažos skaičiavimų sąnaudos. Skaičiavimo sąnaudos yra svarbu, nes žadinimo signalas yra diskretizuotas 44.1 MHz dėl to, įprastai signalė yra apie 500 tūkst. atskaitų.

Sukurtas nulio kirtimo detektorius įgyvendinamas dviem etapais. Pirmame etape žadinimo signalas yra filtruojamas 2000 atskaitų slenkamo vidurkio filtru, taip sumažinant aukšto dažnio triukšmo lygį signalė. Kitame etape nulio kirtimo detektoriaus algoritmas, aptinka visas atskaitų vertes, kurių amplitudės patenka į iš anksto apibrėžtas ribas $\pm U_p$, (kurios įprastai yra 0.003). Į apibrėžtą amplitudžių diapazoną patekusios atskaitos sudedamos ir padalinamos iš sudėtų elementų skaičiaus (apskaičiuojamas vidurkis), tokiu būdu nustatomos perėjimo per nulį pozicijos.

3. Rezultatai

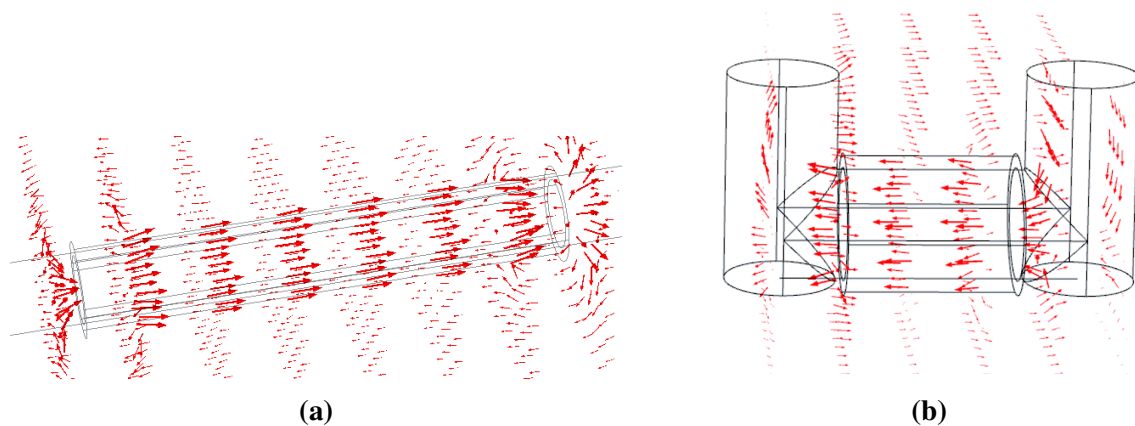
3.1. Žadinimo ritės sukuriamo magnetinio lauko modeliavimas

Nubraižius kūgio, solenoido ir U formos ričių 3D geometrinius modelius bei perkėlus juos į „COMSOL“ programą atliktas magnetinio lauko linijų modeliavimas. SDM sužadinama tik tolygiu magnetiniu lauku, todėl vielutės orientavimas magnetinio lauko linijų atžvilgiu yra svarbus. Kūgio formos ritės struktūra pateikta 3.1 pav. a dalyje. Iš 3.1 pav. b dalies matyti, kad kūgio ritės centrinėje dalyje magnetinio lauko linijų orientacija yra vienoda, tai rodo, kad magnetinis laukas šioje srityje yra tolygus. SDM žadinimo metu turi būti orientuota lygiagrečiai linijoms.



3.1 pav. a) Kūgio formos žadinimo ritės struktūra, b) magnetinio lauko linijų modeliavimas „Comsol“ programine įranga

Iš 3.2 pav. a ir b dalių matyti, kad solenoido ir U formos ritės sukuria tolygų magnetinį lauką aplink feritines šerdis. Kūgio formos žadinimo ritė pavaizduota 3.1 pav. yra tinkamesnė žadinti SDM nei solenoido ar U formos ritės, nes ji sukuria tolygų magnetinį lauką didesniame tūryje. Dėl to SDM pozicija signalo registravimo metu neturi būti griežtai apibrėžta žadinimo ritės atžvilgiu. Tai leidžia lengviau sužadinti SDM ir atlikti signalo registravimą. Pagrindinis kūgio ritės trūkumas yra dideli matmenys, todėl ji tinka tik stacionariuose matavimuose.



3.2 pav. Magnetinio lauko linijų modeliavimas: a) solenoido, b) U formos žadinimo ritėms

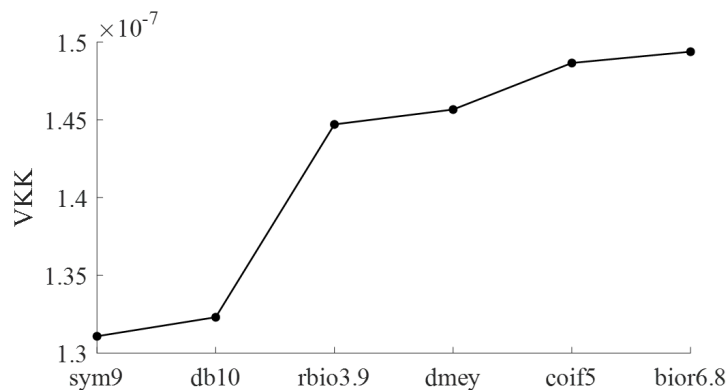
3.2. Modeliuotų signalų tyrimai

Šioje dalyje pateikiami rezultatai gauti atlikus filtravimo metodo, nulio kirtimo detektoriaus, impulsų detektoriaus ir histerezės pločio matavimo algoritmo testavimą su modeliuotais atsako ir žadinimo signalais.

3.2.1. Filtravimo metodo vertinimas

Tyrimo metu buvo siekiama surasti DVT parametrus, kurie leistų kuo tiksliau išskirti SDM signalą iš modeliuoto atsako signalo. Išskirtas ir modeliuotas SDM signalai palyginti taikant vidutinės kvadratinės klaidos (VKK) įvertį. 3.3 pav. pateiktos VKK vertės filtruojant modeliuotus atsako signalus skirtingų tipų vilnelėmis.

Rezultatai rodo, kad *Symlet 9* (*sym9*) ir *Daubenchie* (*Db10*) vilnelės leido išskirti SDM signalą iš modeliuoto atsako signalo su mažiausia paklaida ir yra tinkamiausios lyginant su kitomis vilnelėmis pateiktomis 3.3 pav. Filtravimas su skirtingais dekompozicijos lygiais nuo 1 iki 16 parodė, kad 13 lygių dekompozicija leido pasiekti mažiausias VKK vertes ir yra tinkamiausia atsako signalui filtruoti. Svarbu paminėti, kad *Symlet 9* (*sym9*) ar *Daubenchie* (*Db10*) vilnelės ir 13 dekompozicijos lygis yra optimalūs tik jei atsako signalas yra diskretizuotas 44.1 MHz dažniu, o žadinimo signalo komponentė yra sinuso formos 400 Hz dažnio signalas. Jei atsako signalas turi kitokius parametrus, optimalių DVT nustatymų parinkimo procesas (atsako signalo modeliavimas ir filtravimas skirtingais DVT nustatymais) turi būti pakartotas iš naujo.



3.3 pav. Vilnelės leidusios pasiekti mažiausią vidutinę kvadratinę paklaidą išskiriant SDM signalą iš modeliuoto atsako signalo. VKK vertinta tarp išskirto SDM signalo taikant DVT ir modeliuoto SDM signalo. Dekompozicijos lygių skaičius - 13. Rezultatai vidurkinti iš 40 matavimų

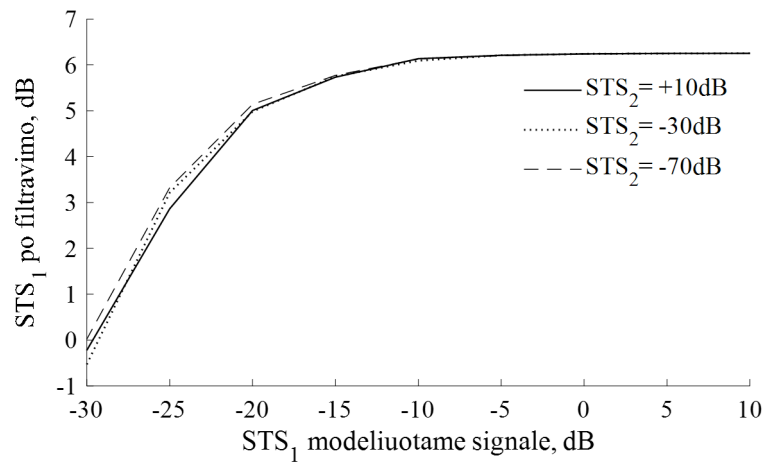
Siekiant įsitikinti ar VKK skirtumai (žr. 3.3 pav.) tarp lygintų vilnelių yra statistiškai reikšmingi, atlikta statistinė analizė. Pritaikius skirstinio normalumo įvertinimo testą (angl. *Shapiro-Wilko*) paaiškėjo, kad VKK matavimai pasiskirstę pagal normalųjį dėsnį. Vienfaktorinė dispersinė analizė parodė, kad skirtumai tarp grupių egzistuoja, nes $p < 0.05$, todėl taikytas t testas, grupių rodančių skirtumą nustatymui. Testo rezultatai kartu su efekto dydžiu (angl. *effect size*) pateikti 3.1 lentelėje. Iš gautų rezultatų galime teigti, kad statistiškai reikšmingo skirtumo tarp *sym9* ir *db10* VKK matavimų nėra, nes gauta p vertė didesnė nei 0.05 reikšmingumo lygmuo.

Efekto dydis rodo, kad tarp *sym9* ir *db10* VKK matavimų imčių yra -0.4 standartinio nuokrypio skirtumas, todėl priimame, kad *sym9* vilnelė yra tinkamesnė atsako signalui filtruoti.

3.1 lentelė. T-testo rezultatai gauti lyginant skirtingų vilnelių VKK

<i>Grupės</i>	<i>sym9 – db10</i>	<i>db10 – rbio3.9</i>	<i>rbio3.9 – dmey</i>	<i>dmey – coif5</i>	<i>coif5 – bior6.8</i>
<i>p vertės</i>	0.08	< 0.001	0.16	< 0.001	0.29
<i>Efekto dydis</i>	-0.40	-3.96	-0.32	-1.02	-0.24

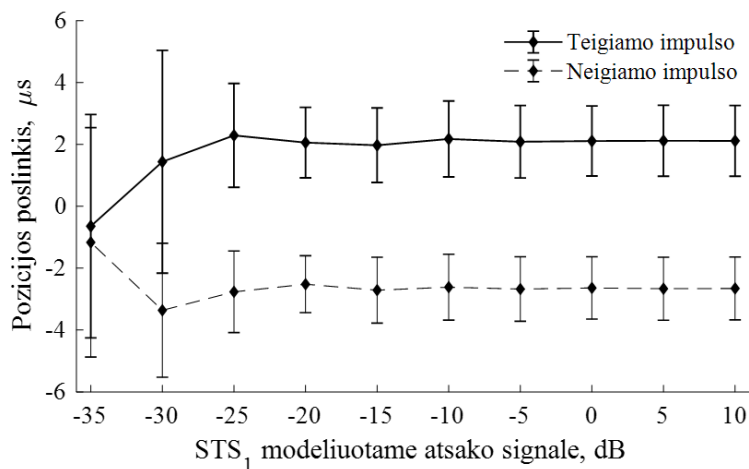
Kito tyrimo metu buvo siekiama įvertinti DVT filtravimo metodo gebėjimą pašalinti triukšmą bei žadinimo signalo dedamąją iš modeliuoto atsako signalo. Filtravimo rezultatai pateikti 3.4 pav. rodo, kad STS_2 (žadinimo signalo dedamosios lygis atsako signalo) nedaro įtakos išskirto SDM signalo STS_1 (signalas-triukšmas santykiui), kai STS_2 kinta ribose nuo +10 dB iki -70 dB. Visgi išskirto SDM signalo STS_1 mažėja, didėjant triukšmo lygiui modeliuotame atsako signalo (mažėjant STS_1) (žr. 3.4 pav.). Kai STS_1 modeliuotame signalo pasiekia -20 dB ribą ir toliau mažėja, DVT nebesugeba nuslopinti triukšmo ir todėl STS_1 išskirtame SDM signalo pradeda mažėti. Iš 3.4 pav. matyti, kad filtruojant DVT, išskirtame mikrovilutės signalo pasiekiamas iki +30 dB STS_1 padidėjimas lyginant su modeliuotu atsako signalu. Dėl to galima teigti, kad DVT filtravimo metodas efektyviai pašalinant triukšmą bei žadinimo signalo dedamąją esančią atsako signalo.



3.4 pav. Išskirto SDM signalo STS_1 priklausomybė nuo modeliuoto atsako signalo parametrų STS_1 ir STS_2 . Parametras STS_1 įvertintas iš SDM ir triukšmo signalo dedamosios, o STS_2 – iš SDM ir žadinimo signalo dedamosios modeliuotame atsako signalo. Modeliavime naudotas Gauso dėsnio pasiskirstęs triukšmo signalas

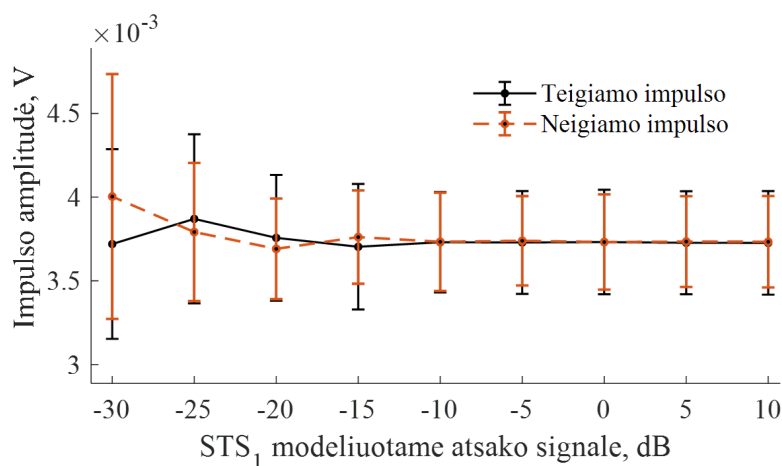
Analizuojant DVT filtravimo rezultatus (žr. 3.5 pav.) taip pat paaiškėjo, kad DVT nėra invariantiška laike (angl. *shift invariant*) dėl to SDM impulsų pozicijos po filtravimo pakinta [24]. Teigiami impulsai yra vėlinami $\sim 2 \mu s$, o neigiami - ankstinami $\sim 2 \mu s$ (žr 3.5 pav.). Vertinant histerezės plotį šie impulsų persislinkimai kompensuojasi ir nedaro įtakos histerezės pločio matavimams, tol kol teigiamų ir neigiamų impulsų persislinkimai yra vienodi.

Impulsų persislinkimo vidurkio vertė išlieka stabili, STS_1 kintant nuo +10 dB iki -25 dB ribose ir siekia apie $2 \mu\text{s}$. STS_1 mažėjant ir viršijus -30 dB, stebimas mažesnis perslinkimo vidurkis, tačiau padidėja standartinis nuokrypis (žr. 3.5 pav.).



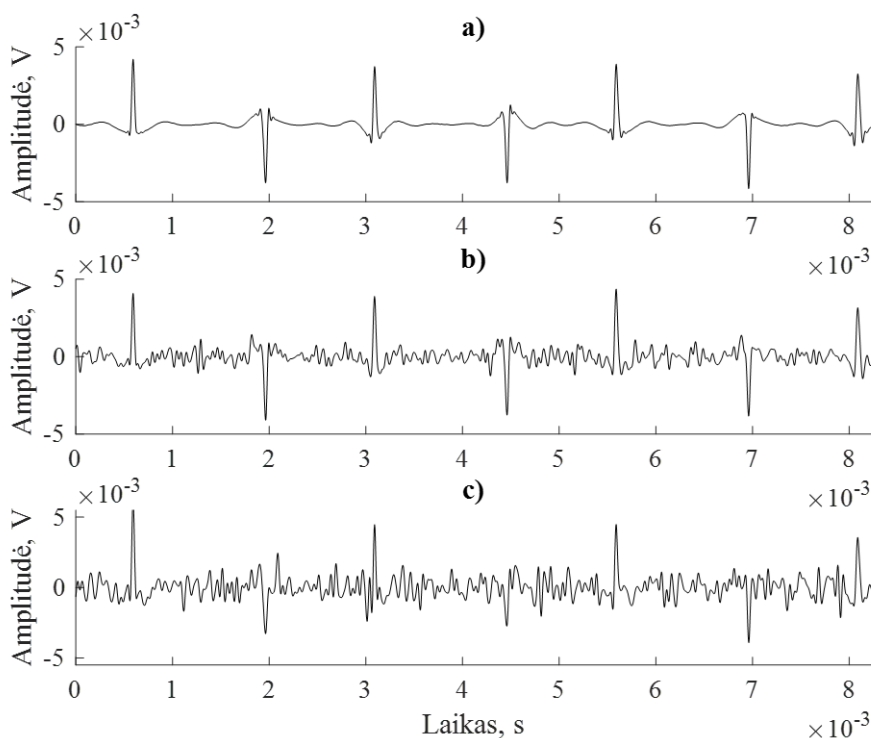
3.5 pav. DVT filtravimo sukkelto SDM impulsų postūmis. Postūmis matuotas tarp impulso padėčių modeliuotame SDM signalė ir SDM signalė išskirtame taikant DVT. Tyrimo metu STS_2 buvo pastovus ir siekė -60 dB. Postūmio vidurkis ir standartinis nuokrypis vertinti iš 20 matavimų

Analizuojant filtravimo rezultatus paaiškėjo, kad DVT iškraipo išskirto signalo amplitudę. Modeliuotame atsako signalė SDM signalo amplitudę buvo pastovi ir siekė 5 mV, tačiau išskirtame signalė amplitudės vidurkis siekia apie 4 mV, o standartinis nuokrypis apie 0.3 mV (žr. 3.6 pav.). Amplitudės vertės vidurkis variuoja platesnėse ribose, didėjant triukšmo lygiui (mažėjant STS_1) modeliuotame atsako signalė (žr. 3.6 pav.). Nors DVT ir sukelia amplitudės sumažėjimą išskirtame SDM signalė, tačiau toks amplitudės sumažėjimas nėra reikšmingas, nes histerezės pločio matavimo metu yra stebimos impulsų pozicijos, o ne amplitudės.



3.6 pav. SDM impulsų amplitudės po filtravimo DVT. Tyrimo metu STS_2 buvo pastovus -60 dB. Impulsų amplitudės vidurkis ir standartinis nuokrypis vertinti iš 20 matavimų

Signalų morfologijų palyginimui, esant skirtingiems STS_1 išskirtame SDM signaluose pavaizduoti 3.7 pav. SDM signaluose, kurių STS_1 siekia +6.2 dB impulsų pozicijos yra aiškios ir nesunkiai aptinkamos (žr. 3.7 pav. a). STS_1 sumažėjus iki 0 dB, signaluose matyti daugiau aukšto dažnio triukšmų ir iškreipimų impulsų formoje (žr. 3.7 c). Taip pat, kai kurių SDM impulsų amplitudės yra pastebimai sumažėjusios, tai ypač atsispindi neigiamuose impulsuose. Sumažėjusi amplitudė ir padidėjęs triukšmo lygis apsunkina impulsų atpažinimą signaluose.



3.7 pav. SDM impulsų morfologija, kai STS_1 lygis po filtravimo yra: a) +6.2 dB, b) +3.3 dB c) +0 dB. SDM signalai išskirti iš modeliūtų atsako signalų, taikant optimalius DVT nustatymus

3.2.2. Impulsų detektoriaus vertinimas

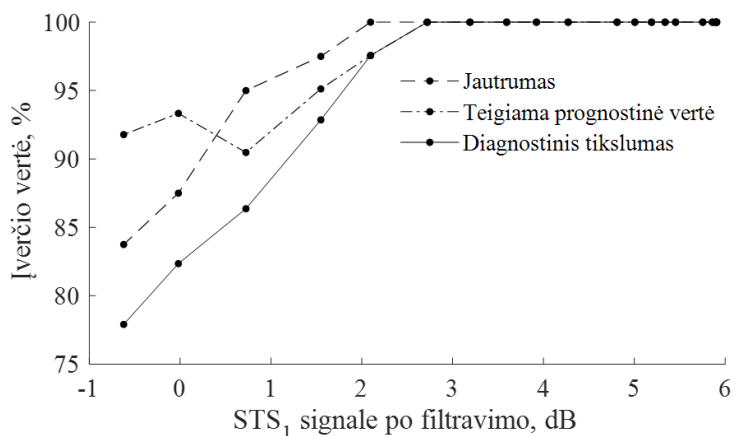
Šio tyrimo metu buvo siekiama įvertinti impulsų detektoriaus gebėjimą aptikti SDM impulsus įvairaus STS_1 filtruotuose SDM signaluose. Impulsų pozicijos nustatinėtos SDM signaluose išskirtuose iš modeliūtų atsako signalų taikant DVT.

Žadinimo signalo dedamosios lygis modeliūtame atsako signaluose (STS_2) buvo pastovus ir siekė -50 dB, o triukšmo lygis STS_1 kito ribose nuo +10 dB iki -30 dB. STS_1 nuo +10 dB iki -15 dB kito 5 dB žingsniu, o nuo -15 dB iki -30 dB, 1 dB žingsniu. Toks STS_1 žingsnis pasirinktas, nes norėta ištestuoti detektorius su kuo daugiau signalų, turinčių mažesnę STS_1 . Kiekvienai STS_1 vertei, sugeneruota 10 atsako signalų, po 4 žadinimo periodus kiekviename.

Histerezės pločio matavimams kalibruoti tikimasi naudoti dvi vielutes: atraminę ir matavimo, todėl modeliuotame atsako signalė buvo sugeneruoti dviejų SDM impulsai. Žadinimo signalo (sinuso) periode sugeneruoti du teigiami ir du neigiami impulsai, vienas šalia kito.

Impulsų detektorių ištestavus su modeliuotais atsako signalais pastebėta, kad detektoriaus diagnostinis tikslumas, jautrumas ir teigiama prognostinė vertė išlaiko 100 % vertes, tol kol STS_1 vertės išskirtame SDM signalė yra didesnės nei +3 dB (žr. 3.8 pav.). Mažėjant STS_1 (didėjant triukšmo lygiui išskirtame SDM signalė), detektoriaus įverčiai mažėja.

Histerezės pločio vertinimas iš mažesnių STS_1 turinčių SDM signalų yra įmanomas, matuojant histerezės plotį tik iš aptiktų impulsų. Problema, tai kad praleidžiant neaptiktus impulsus prarandama informacija apie histerezės plotį, dėl to mažėja matavimų skaičius. Norint išlaikyti tą patį matavimų skaičių reikia ilginti atsako signalo įrašą.

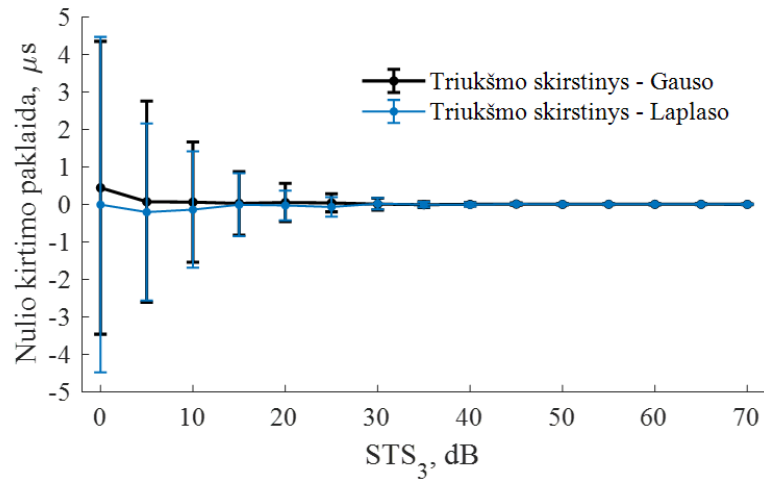


3.8 pav. Impulsų detektoriaus jautrumo, teigiamos prognostinės vertės ir diagnostinio tikslumo priklausomybės nuo STS_1 išskirtame SDM signalė

3.2.3. Nulio kirtimo ir histerezės pločio algoritmų vertinimas

Tyrimo metu buvo siekiama įvertinti nulio kirtimų detektoriaus paklaidą, kintant triukšmo lygiui žadinimo signalė. Rezultatai parodė, kad nulio kirtimo detektoriaus absoliutinės paklaidos vidurkis išlieka pastovus ir nesiekia $1 \mu s$, STS_3 žadinimo signalė kintant nuo +70 dB iki 0 dB (žr. 3.9 pav.). Pastebėta, kad nulio kirtimo paklaidos standartinis nuokrypis didėja, mažėjant STS_3 (didėjant triukšmo lygiui žadinimo signalė). Visgi, standartinio nuokrypio vertės nėra didelės ir STS_3 intervale nuo +70 dB iki +20 dB nesiekia 1–2 μs , o krintant STS_3 žemiau +20 dB, varijuoja 5 μs ribose. Realių matavimų metu, žadinimo signalo STS_3 yra aukštas, viršijantis ~ 30 dB, todėl nulio kirtimo paklaida svyruos $\pm 1 \mu s$ ribose.

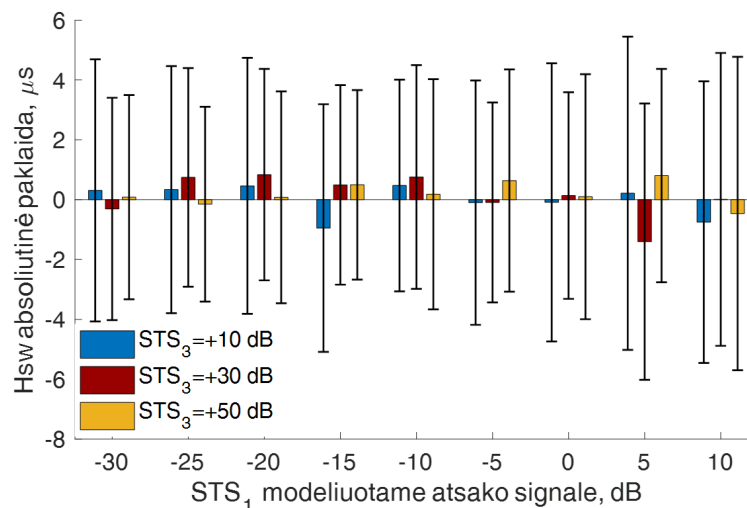
Nulio kirtimo paklaidos vidurkis ir standartinis nuokrypis vertintas iš žadinimo signalų užterštų Laplaso triukšmu neparodė, didesnių verčių lyginant su paklaida gauta iš Gauso triukšmu užterštų signalų.



3.9 pav. Nulio kirtimo absoliutinės paklaidos priklausomybė nuo triukšmo lygio žadinimo signale. Paklaida vertinta modeliuotuose žadinimo signaluose, esant Gauso ir Laplaso triukšmams signale. Vidurkis ir standartinis nuokrypis įvertinti iš 90 matavimų

Kito tyrimo metu buvo siekiama įvertinti sukurto histerezės pločio matavimo algoritmo paklaidą. Paklaida vertinta naudojant modeliuotus atsako ir žadinimo signalus. Tyrimo metu STS_1 (triukšmo lygis) modeliuotame atsako signale buvo keičiamas intervale nuo +10 dB iki -30 dB kas 5 dB, o STS_2 (žadinimo dedamosios lygis) buvo pastovus, siekiantis -50 dB. Žadinimo signalo STS_3 tyrimo metu įgavo +10, +30 ir +50 dB vertes.

Rezultatai parodė, kad modeliuotuose signaluose išmatuotos histerezės pločio H_{sw} absoliutinės paklaidos vidurkis svyruoja $\pm 2 \mu s$, o standartinis nuokrypis $\pm 6 \mu s$ ribose (žr. 3.10 pav.). Taip pat iš 3.10 pav. matyti, kad mažesnę STS_3 (didesnę triukšmo lygį) turintys žadinimo signalai nesukelia histerezės pločio matavimo paklaidų didesnių nei $2 \mu s$.



3.10 pav. Histerezės pločio H_{sw} absoliutinės paklaidos priklausomybė nuo STS_1 modeliuotame atsako signale bei STS_3 žadinimo signale. STS_2 šio eksperimento metu buvo pastovus, -50 dB.

Absoliutinė paklaida vertinta modeliuotuose signaluose, lyginant modeliuotą H_{sw} vertę su išmatuota po signalų apdorojimo. Vidurkis ir standartinis nuokrypis įvertinti iš 40 H_{sw} matavimų

Ypač svarbu tai, kad žemesniu STS_1 (didesniu triukšmo lygiu) pasižymėję atsako signalai neparodė didesnių histerezės pločio paklaidų, lyginant su aukštesnį STS_1 turinčiais signalais. H_{sw} paklaidos vidurkis nepriklausomai nuo STS_1 lygio atsako signale, išlieka panašus ir siekia apie $\pm 2 \mu s$.

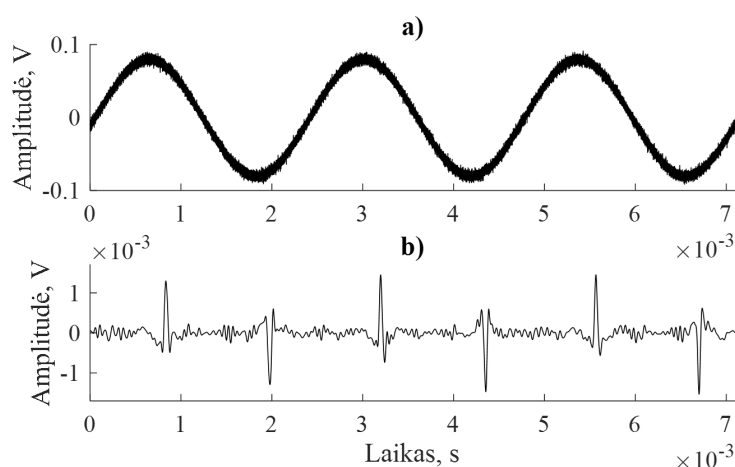
Realių temperatūros ir deformacijų matavimų metu užregistruotas maksimalus histerezės pločio pokytis siekia $100 \mu s$ ir $150 \mu s$. Palyginus šias vertes su histerezės pločio paklaidos vertėmis $2 \mu s$, galime teigti, kad algoritmo paklaida neviršija 2 % išmatuotų histerezės pločio verčių.

3.3. Realių signalų tyrimai

Šioje dalyje pateikiami tyrimų rezultatai gauti naudojant realias mikrovielutes. Aprašomi signalų registravimo atstumo, poveikio nuolatiniu magnetiniu lauku, temperatūros bei deformacijų tyrimų rezultatai.

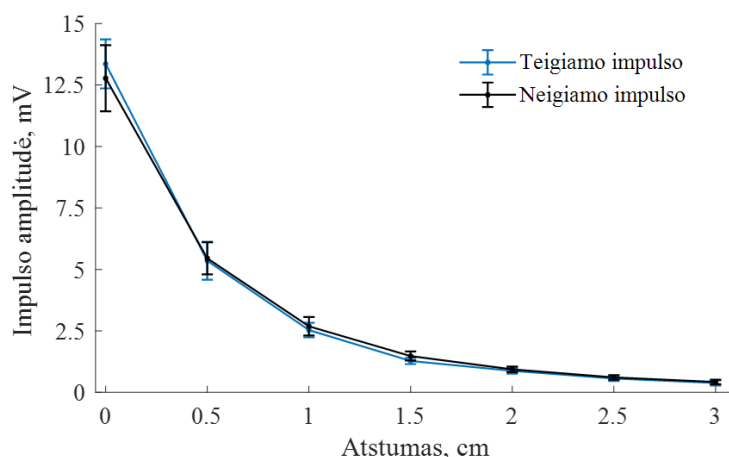
3.3.1. Mikrovielutės signalų analizė

SDM signalo išskyrimo metodą išbandžius su modeliuotais atsako signalais pereita prie realių signalų filtravimo. Iš realaus atsako signalo (žr. 3.11 pav. a) išskirto SDM signalo morfologija pateikta 3.11 pav. b dalyje. Vizualiai įvertinus išskirtą SDM signalą galime teigti, kad STS po filtravimo yra aukštas, nes impulsų pozicijos yra aiškiai pastebimos, taip pat signale nematyti triukšmo artefaktų, kurie galėtų suklaidinti impulsų detektorius.



3.11 pav. a) Užregistruotas atsako signalas, b) SDM signalas po filtravimo DVT

Sekančiame tyrime buvo siekiama išsiaiškinti ar priėmimo ritės atstumas nuo SDM daro įtaką priėmimo ritėje registruojamų SDM signalų amplitudei. Atlikus užregistruotų atsako signalų filtravimą matyti, kad priėmimo ritei tolstant nuo SDM, priėmimo ritėje registruojamų SDM impulsų amplitudė mažėja eksponentiniu dėsniu, o viršijus 3 cm tampa žemesnė nei 1 mV (žr. 3.12 pav.). Tolstant priėmimo ritei 0–3 cm ribose, SDM impulsų amplitudė sumažėja daugiau nei 12 kartų, nuo 12.5 mV iki 1 mV (žr. 3.12 pav.). Šie rezultatai patvirtina, kad priėmimo ritės atstumas atžvilgiu SDM yra svarbus, norint pasiekti aukštą STS. Dėl šios priežasties signalų registravimo metu, stengiamasi priėmimo ritę laikyti kuo arčiau SDM.

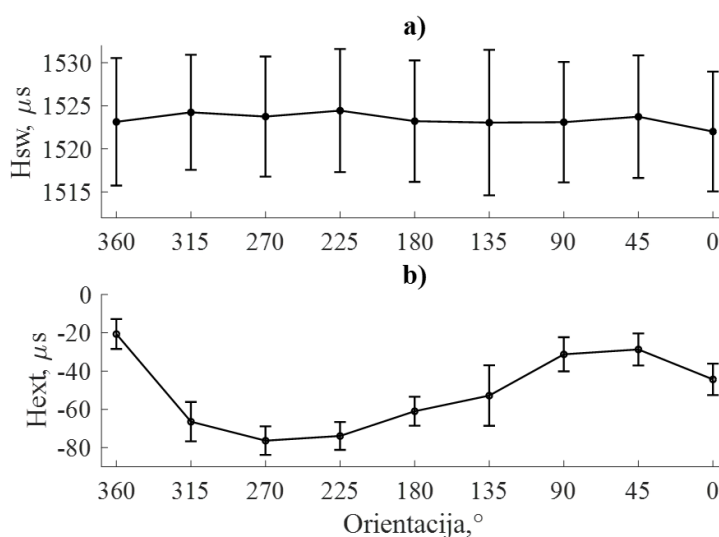


3.12 pav. Priėmimo ritėje registruojamų SDM impulsų amplitudės priklausomybė nuo priėmimo ritės atstumo iki SDM. Vidurkis ir standartinis nuokrypis įvertinti iš 60 matavimų

3.3.2. Poveikio nuolatinio magnetinio lauko tyrimai

Šiuo tyrimu buvo siekiama išsiaiškinti ar nuolatinis Žemės magnetinis laukas daro įtaką SDM magnetinės histerezės pločiui. Tyrimo metu SDM orientacija Žemės magnetinio lauko atžvilgiu buvo keičiama 0–360° ribose, pasukant SDM 45° žingsniu pagal laikrodžio rodyklę, rytų kryptimi. SDM pradinėje, 0° padėtyje, orientuota statmenai šiaurės kryptimi.

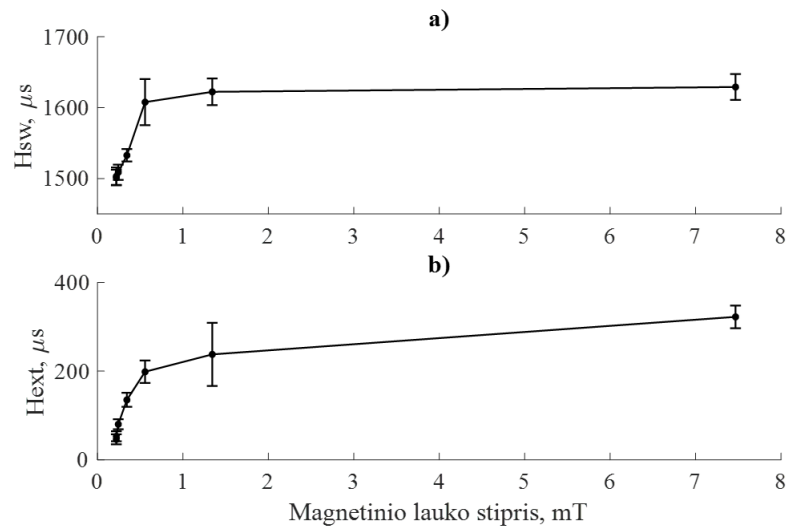
Analizuojant tyrimo rezultatus pastebėta, kad keičiant SDM orientaciją 0–360° ribose, SDM magnetinės histerezės plotis pakinta apie $\pm 2.5 \mu s$ (žr. 3.13 pav. a), o histerezės kilpa H_{ext} persislenka apie $60 \mu s$ (žr. 3.13 pav.). Dėl to galime teigti, kad histerezės pločio H_{sw} vertės praktiškai nepriklauso nuo orientacijos Žemės magnetiniame lauke ir išlieka stabilios (žr. 3.13 pav. a), tačiau histerezės kilpos persislinkimo dydis ir kryptis H_{ext} priklauso nuo orientacijos Žemės magnetiniame lauke.



3.13 pav. a) histerezės pločio H_{sw} ir b) histerezės kilpos poslinkio H_{ext} priklausomybė nuo orientacijos Žemės magnetiniame lauke. H_{sw} ir H_{ext} parametrų vidurkis ir standartinis nuokrypis įvertinti iš 160 matavimų

Taip pat tyrimo rezultatai (3.13 pav.) rodo, kad SDM galima naudoti, kaip ypač mažų matmenų nuolatinio magnetinio lauko jutiklius arba kompasus. Vertinant histerezės kilpos persislinkimo dydį H_{ext} galima spręsti apie magnetinio lauko poliarumą ir stiprį. Visgi, prieš perskaičiuojant histerezės poslinkio H_{ext} laikines vertes (μs) į realias magnetinio lauko stiprio vertes (A/m ar mT), reikėtų atlikti kalibravimą su žinomo dydžio magnetinio lauko šaltiniu.

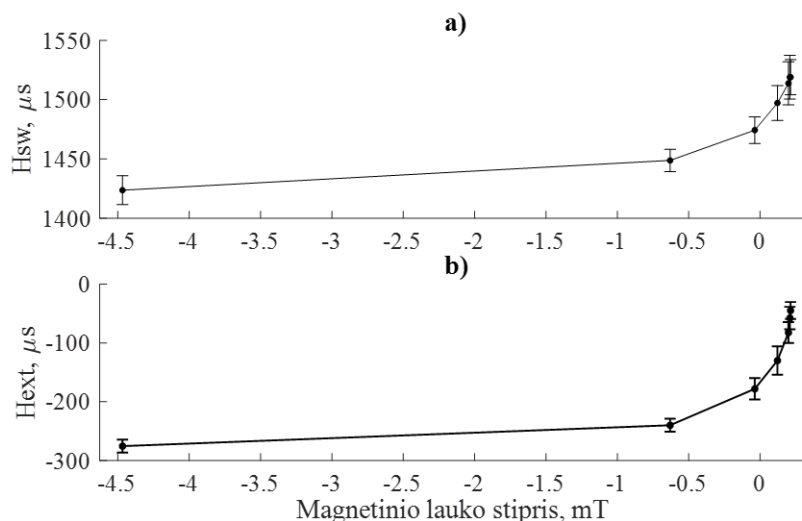
Kito tyrimo metu buvo siekiama išsiaiškinti ar SDM magnetinės histerezės plotis priklauso nuo nuolatinio magnetinio lauko stiprio. Žemės magnetinis laukas yra silpnas, siekiantis $40\text{--}60 \mu T$, dėl to šio tyrimo metu pasitelktas neodimio magnetas, leidžiantis sukurti stiprų nuolatinį magnetinį lauką. Magnetinio lauko stipris veikiantis SDM koreguotas keičiant magneto atstumą SDM atžvilgiu. Tyrimo rezultatai parodė, kad didinant nuolatinio magnetinio lauko stiprį nuo 0 iki 7.5 mT, histerezės kilpa persislenka į dešinę, tai rodo H_{ext} verčių didėjimas nuo 0 iki $380 \mu s$ (žr. 3.14 pav. b). Tačiau didėjant nuolatinio magnetinio lauko stipriui, pakinta ir histerezės plotis H_{sw} nuo $1500 \mu s$ iki $1600 \mu s$ (žr. 3.15 pav. a).



3.14 pav. Histerezės pločio H_{sw} ir histerezės persislinkimo H_{ext} priklausomybės nuo teigiamo poliarumo nuolatinio magnetinio lauko. H_{sw} bei magnetinio lauko stiprio vidurkis ir standartinis nuokrypis įvertinti iš 60 matavimų

Pakeitus magnetinio lauko poliarumą ir didinant neigiamo nuolatinio magnetinio lauko stiprį nuo 0 iki -4.5 mT , histerezės kilpa persislenka nuo $0 \mu s$ iki $300 \mu s$ (žr. 3.15 pav. b), o histerezės plotis sumažėja nuo $\sim 1500 \mu s$ iki $1420 \mu s$ (žr. 3.15 pav. a).

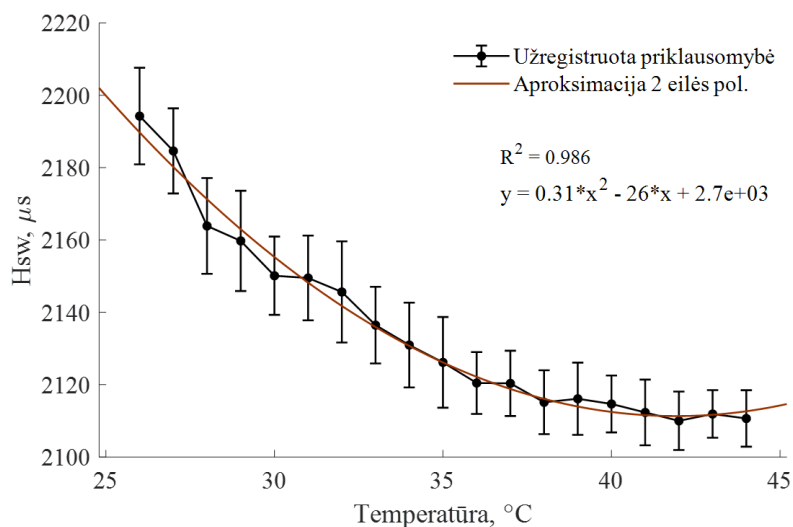
Histerezės pločio kitimas dėl nuolatinio magnetinio lauko poveikio yra žalingas efektas, kuris apsunkina temperatūros ir deformacijų vertinimą remiantis histerezės pločio vertėmis. Dėl to atsiranda poreikis kalibravimo metodo, kuris leistų pašalinti nuolatinio magnetinio lauko sukeltą histerezės pločio dedamąją.



3.15 pav. Histerezės pločio H_{sw} ir histerezės persislinkimo H_{ext} priklausomybės nuo neigiamo poliarumo nuolatinio magnetinio lauko. H_{sw} bei magnetinio lauko stiprio vidurkis ir standartinis nuokrypis įvertinti iš 60 matavimų

3.3.3. Temperatūros ir mechaninių deformacijų tyrimai

Šio tyrimo metu buvo siekiama iširti SDM histerezės pločio reakciją į temperatūrą. Tyrimo metu SDM patalpinta temperatūriniame stende, kuriame temperatūros vertė didinta nuo 26 iki 44 °C. Tyrimo rezultatai parodė, kad SDM histerezės plotis mažėja, didėjant temperatūrai (žr. 3.16 pav.). Dėl mažėjančio histerezės pločio, slenkstinė magnetinio lauko vertė reikiama permagnetinti SDM centrinį domeną mažėja, todėl SDM įmanoma sužadinti silpnesniu magnetiniu lauku.



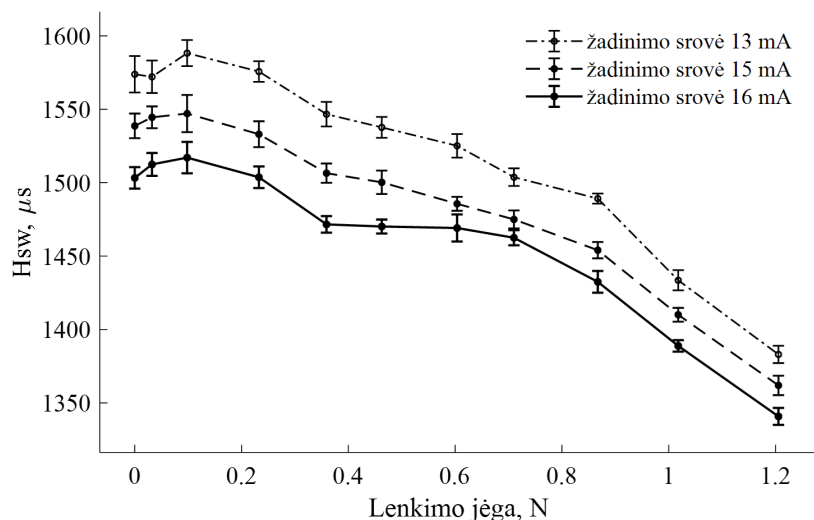
3.16 pav. Histerezės pločio H_{sw} temperatūrinė priklausomybė ir jos aproksimacija antros eilės polinomu. H_{sw} vidurkis ir standartinis nuokrypis įvertinti iš 30 matavimų. Eksperimento metu temperatūra didinta nuo 26 °C iki 44 °C, 1 °C / 2 min. žingsniu

Histerezės pločio temperatūrinė charakteristika nėra tiesinė (žr. 3.16 pav.). 26–36 °C diapazone histerezės pločio sumažėjimas yra gana didelis, siekiantis apie 70 μs, o 36–44 °C diapazone – siekiantis vos apie 10–20 μs. Nors histerezės pločio pokytis 36–44 °C diapazone ir yra mažesnis, tačiau jį įmanoma užregistruoti. Temperatūrinę histerezės pločio charakteristiką galima ištiesinti

taikant polinomų aproksimaciją ir aprašant charakteristiką matematiškai. Priėmus, kad užregistruota temperatūrinė charakteristika yra tiesinė, pasiekiamas $4.6 \mu\text{s} / ^\circ\text{C}$ jautrumas.

Kito tyrimo metu buvo siekiama įvertinti histerezės pločio reakciją į deformacijas ir skirtingą žadinimo magnetinio lauko stiprį. Tyrimo metu SDM buvo deformuojama tolygiai didėjančia lenkimo jėga ir žadinama skirtingu magnetinio lauko stipriu. Žadinimo magnetinio lauko stipris koreguotas keičiant srovę tekančią žadinimo rite. Tyrimo rezultatai parodė, kad didėjant lenkimo jėgai nuo 0 N iki 1.2 N, histerezės plotis sumažėja nuo $1570 \mu\text{s}$ iki $1420 \mu\text{s}$ (žr. 3.17 pav. žad. srovė 13 mA). Priėmus, kad deformacijų charakteristika yra tiesinė (žr. 3.17 pav.), pasiekiamas $135 \mu\text{s} / \text{N}$ jautrumas.

Prie pastovios lenkimo jėgos (pvz., 0 N) paanalizavus tyrimo rezultatus matyti, kad didėjant žadinimo srovei nuo 13 mA iki 16 mA histerezės plotis H_{sw} mažėja (žr. 3.17 pav.). Šie rezultatai rodo, kad SDM histerezės plotis priklauso nuo žadinimo magnetinio lauko stiprio. Ši priklausomybė stebima, nes žadinant SDM stipresniu magnetiniu lauku pakinta žadinimo signalo kitimo greitis. Žadinimo signalo (sinuso) frontai tampa statesni, dėl to slenkstinės magnetinio lauko stiprio vertės reikalingos permagnetinti vielutę, pasiekiamos greičiau, todėl sutrumpėja t_p ir t_n intervalai, o taip pat ir jų suma, parodanti histerezės plotį H_{sw} .



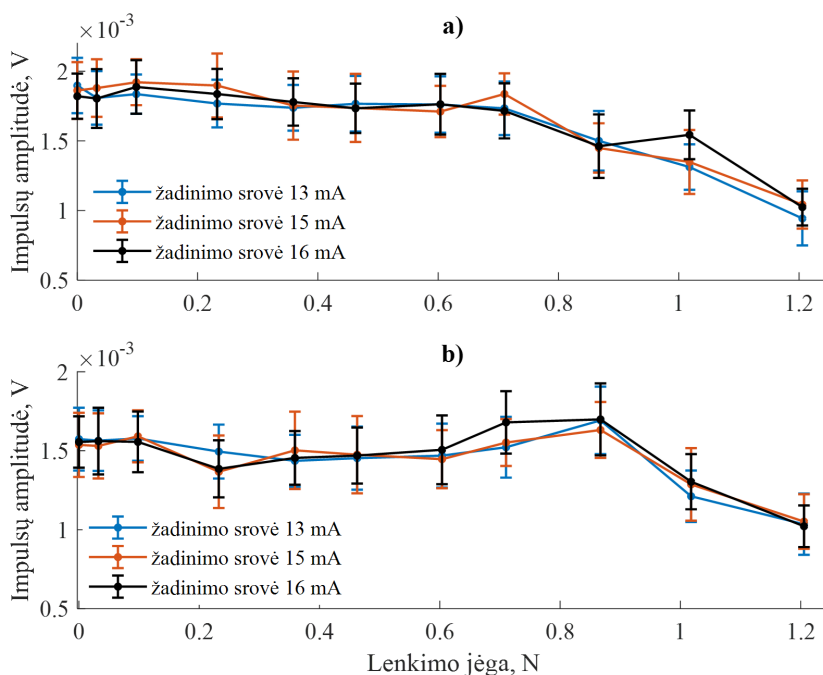
3.17 pav. Histerezės pločio H_{sw} priklausomybės nuo lenkimo jėgos, tekant skirtingo dydžio srovėms žadinimo rite. H_{sw} vidurkis ir standartinis nuokrypis įvertinti iš 20 matavimų, o lenkimo jėga iš 100 matavimų. Stumoklio eiga tyrimo metu kito 0–0.92 mm ribose

Skirtinga žadinimo srove užregistruotos histerezės pločio priklausomybės nuo lenkimo jėgos yra panašios, skirtumas tik tas, kad priklausomybės yra persislinkę per $50 \mu\text{s}$ (žr. 3.17 pav.). Siekiant gauti atsikartojančius histerezės pločio matavimus, patartina SDM žadinti fiksuotą vertę turinčiu magnetinio lauko stipriu ir žadinimo signalo dažniu [1, 5, 25]. Histerezės pločio matavimų metu svarbu išlaikyti netik pastovią srovę tekančią žadinimo rite, bet ir pastovų žadinimo ritės atstumą iki SDM, tik tokiu atveju pavyks išlaikyti pastovų žadinimo magnetinio lauko stiprį veikiantį SDM. SDM svarbu žadinti tokia magnetinio lauko stiprio verte, kuri pajėgtų permagnetinti centrinį domeną, tačiau būtų ne per stipri. Žadinant SDM per stipriu magnetiniu lauku, (dėl žadinimo sig-

nalo fronto statumo didėjimo) temperatūros ar deformacijų sukelti t_p ir t_n intervalų pokyčiai taps ženkliai mažesni, negu žadinant silpnesniu lauku. Būtent dėl šios priežasties, žadinant per stipriu magnetiniu lauku tyrimo metu galime išvis nematyti histerezės pločio pokyčio arba jį gauti labai mažą. Laikinio skiriamumo atžvilgiu, SDM žadinimas silpnesniu magnetiniu lauku yra pranašesnis nei žadinimas pernelyg stipriu lauku, nes ilgesnius t_p ir t_n intervalus išmatuoti galime tiksliau negu trumpesnius, nekeičiant diskretizavimo dažnio. Žadinimo signalo dažnis taip pat daro įtaką t_p ir t_n intervalams. Žemesnis žadinimo dažnis leidžia užregistruoti didesnius histerezės pločio pokyčius laikinėje srityje, nei žadinimas aukštesniu dažniu.

Kito tyrimo metu buvo siekiama įvertinti SDM impulsų amplitudės reakciją į deformacijas ir skirtingą žadinimo magnetinio lauko stiprį. Tyrimo rezultatai parodė, kad didinant lenkimo jėgą (nuo 0 iki 1.2 N), priėmimo ritėje registruojamų SDM impulsų amplitudė mažėja. Teigiamų impulsų amplitudė sumažėja nuo ~ 2 mV iki 1 mV, o neigiamų nuo ~ 1.5 mV iki 1 mV (žr. 3.18 pav). Lenkimo jėgai didėjant ir viršijant 1.2 N vertę, SDM impulsų amplitudė ir toliau mažėtų, kol impulsai taptų praktiškai neišskiriami iš triukšmo signalo.

SDM impulsų amplitudės mažėjimas didėjant deformacijoms, riboja maksimalią deformacijų vertę, kurią galima išmatuoti SDM, nes mažėjant amplitudei, impulsus vis sudėtingiau aptikti signalė ir išmatuoti histerezės plotį.



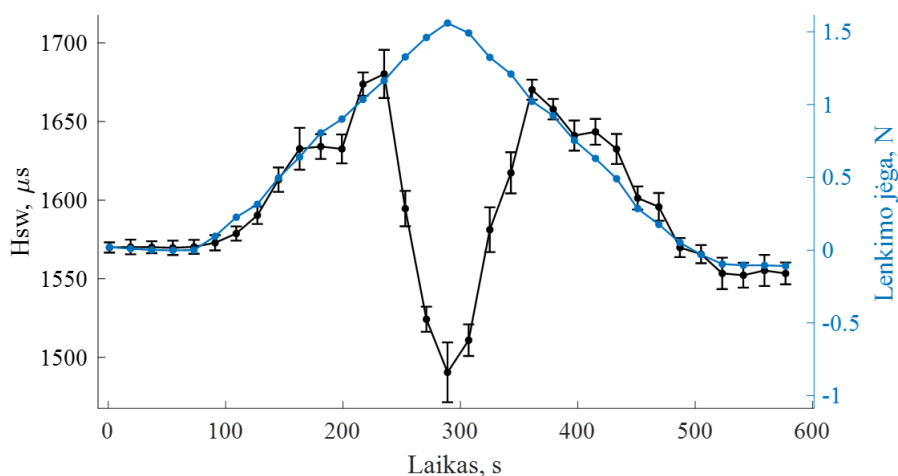
3.18 pav. SDM generuojamų: a) teigiamų ir b) neigiamų impulsų priklausomybės nuo lenkimo jėgos, tekant skirtingo dydžio srovėms žadinimo rite. Impulso amplitudės vidurkis ir standartinis nuokrypis įvertinti iš 20 matavimų, o lenkimo jėga iš 100 matavimų. Stumoklio eiga tyrimo metu kito 0–0.92 mm ribose

Žadinant SDM stipresniu magnetiniu lauku (keičiant žadinimo srovę nuo 13 mA iki 16 mA) impulsų amplitudė išlieka panaši ir ženklus amplitudės pokyčio nematyti (žr. 3.18 pav. a ir b). Dėl to negalime teigti, kad žadinimas stipresniu magnetiniu lauku leidžia SDM sugeneruoti didesnės amplitudės impulsus.

Nors ir SDM impulsų amplitudė priklauso nuo lenkimo jėgos, tačiau amplitudės nepatartina taikyti deformacijoms vertinti, nes ji priklauso nuo daugelio faktorių, kuriuos sudėtinga prognozuoti. Impulsų amplitudė priklauso nuo priėmimo ritės atstumo iki SDM, ši faktą patvirtina tyrimo rezultatai pateikti ankstesniame tyrime 3.12 pav. Taip pat SDM impulso amplitudė priklauso ir nuo triukšmo lygio atsako signale. Patikimesnis sprendimas deformacijoms ar temperatūrai vertinti yra SDM magnetinės histerezės pločio registravimas.

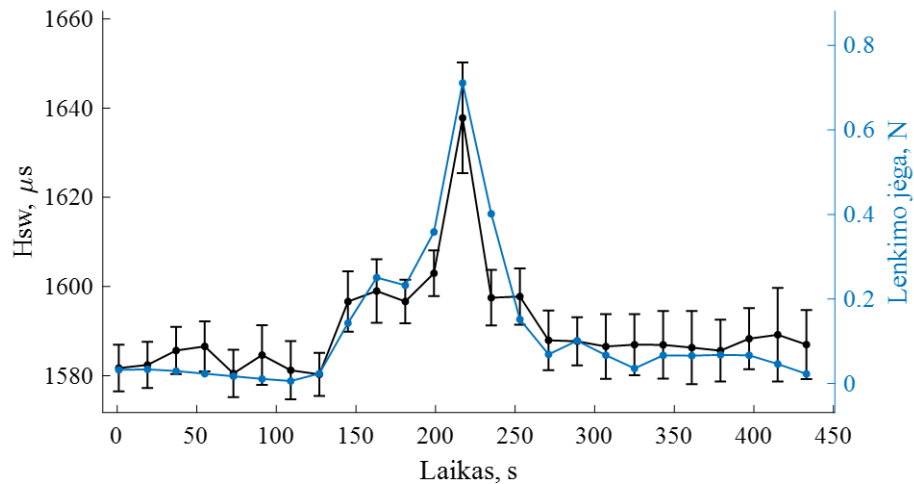
Kito tyrimo metu buvo siekiama išanalizuoti SDM histerezės pločio reakciją į lenkimo jėgą, laikinėje srityje. Šio tyrimo metu naudotas kitas SDM bandinys, tačiau jo geometrinės charakteristikos ir cheminė kompozicija buvo tokia pat kaip ankstesniuose deformacijų tyrimuose pateiktuose 3.17 ir 3.18 pav. Analizuojant šiuo bandiniu gautus rezultatus matyti, kad didėjanti lenkimo jėga sukelia histerezės pločio didėjimą, o ne mažėjimą, kaip užregistruota ankstesniuose tyrimuose (3.17 ir 3.18 pav.).

Taip pat tyrimo rezultatai (žr. 3.19 pav.) rodo, kad didinant lenkimo jėgos dydį, histerezės plotis palaipsniui didėja, tačiau viršijus 1.1 N lenkimo jėgos ribą, histerezės plotis H_{sw} staiga pakeičia kitimo kryptį ir pradeda mažėti. Būtent dėl šio efekto SDM gali registruoti lenkimo jėgą tik iki tam tikros kritinės vertės, šio atveju 1.1 N. Viršijus 1.1 N ribą, histerezės pločio H_{sw} vertės persidengia su ankstesnėmis histerezės pločio H_{sw} vertėmis, dėl to negalime nustatyti konkrečios lenkimo vertės. SDM nuo per didelės lenkimo jėgos (didesnės nei 1.1 N) nėra sugadinama. Sumažinus lenkimo jėgą žemiau 1.1 N, histerezės plotis atsistato ir žemesnės vertės (negu 1.1 N) gali būti registruojamos.



3.19 pav. Histerezės pločio ir deformacijų laikinės priklausomybės. H_{sw} vidurkis ir standartinis nuokrypis įvertinti iš 40 histerezės pločio matavimų, o lenkimo jėgos vidurkis iš 100 matavimų. Stumoklio eiga tyrimo metu kito 0–1.31 mm ribose, ~ 0.1 mm žingsniu

SDM deformavimo eksperimentą pakartojus iš naujo su mažesne (nei 1.1 N) lenkimo jėga, gauti rezultatai pateikti 3.20 pav. Analizuojant 3.20 pav. pateiktus rezultatus nematome histerezės pločio mažėjimo, nes lenkimo jėga tyrimo metu nepasiekė kritinės deformacijų vertės 1.1 N. Histerezės pločio kitimo tendencija yra panaši lyginant su atraminiu lenkimo jėgos signalu gautu iš tenzo jutiklio (mėlyna linija) (žr. 3.20 pav.).



3.20 pav. Histerezės pločio ir deformacijų laikinės priklausomybės. H_{sw} vidurkis ir standartinis nuokrypis įvertinti iš 40 histerezės pločio matavimų, o lenkimo jėgos vidurkis iš 100 matavimų. Stumoklio eiga tyrimo metu kito 0–0.74 mm ribose, ~ 0.1 mm žingsniu

Diskusija

Pagrindinė problema, trukdanti panaudoti SDM belaidžiuose temperatūros ir deformacijų matavimuose yra histerezės pločio matavimų nepastovumas, kurį sukelia nuolatinio ir žadinimo magnetinio lauko stiprio poveikiai. Nuolatinio magnetinio lauko sukeltų histerezės pločio iškreipimų įmanoma išvengti iš registravimo aplinkos pašalinus, stiprų nuolatinį magnetinį lauką skleidžiančius šaltinius. Tačiau žadinimo magnetinio lauko įtaka histerezės pločiui išlieka. Šaltiniuose [25, 26] pateikta informacija patvirtina, kad histerezės plotis priklauso nuo žadinimo magnetinio lauko dažnio ir amplitudės. Dėl to, siekiant gauti atsikartojančius histerezės pločio matavimus, rekomenduojama žadinti SDM pastovios amplitudės ir dažnio magnetiniu lauku [1, 5, 25, 27]. Žadinimo magnetinio lauko stiprio, (pvz., kintančiu sinuso dėsnio), minimumų ir maksimumų vertės turi būti pastovios.

Pastovų magnetinio lauko dažnį išlaikyti nėra sunku, tačiau pastovų magnetinio lauko stiprį įmanoma pasiekti tik išlaikant fiksuotą žadinimo signalo amplitudę ir pastovų atstumą tarp žadinimo ritės ir SDM, nes žadinimo ritės sukuriama magnetinio lauko stipris priklauso nuo atstumo. Realių matavimų metu, pritvirtinus SDM prie implanto, pastovų magnetinio lauko stiprį išlaikyti sunku, nes žadinimo ritės pozicija implanto atžvilgiu gali keistis.

Tikėtina, kad daugelį neigiamų efektų, iškraipančių histerezės pločio matavimus būtų galima kompensuoti naudojant diferencinį matavimo metodą ir pasitelkiant dvi vielutes: matavimo ir atraminę. Matavimo vielutė būtų taikoma temperatūrai arba deformacijoms registruoti, o atraminė – žadinimo magnetinio lauko stipriui vertinti. Atraminės SDM histerezės plotis priklausytų tik nuo žadinimo magnetinio lauko stiprio. Dėl unikalios šerdies kompozicijos ir atšildymo (angl. *annealing*) procedūros yra įmanoma pagaminti temperatūrai nejautrią atraminę SDM [2]. Deformacijų poveikis būtų eliminuojamas, temperatūrai nejautrią SDM patalpinant apsauginėje kapsulėje. Atraminė SDM kapsulė būtų tvirtinama lygiagrečiai, šalia temperatūros jutimo vielutės.

Prieš realius matavimus būtų atliekama kalibravimo procedūra, kurios metu jutimo ir atraminės SDM histerezės pločio vertės būtų išmatuotos esant skirtingoms išorinio poveikio (temperatūros ar deformacijų) ir magnetinio lauko stiprio vertėms. Išmatuotos histerezės pločio vertės prie žinomų magnetinio lauko stiprio ir išorinio poveikio verčių būtų naudojamos sukurti kalibracinę lentelę. Remiantis šia lentele būtų įmanoma perskaičiuoti histerezės pločio vertes į išorinio poveikio (temperatūros ar deformacijų) reikšmes realių matavimų metu.

Išvados

1. Atlikta mokslinės literatūros analizė parodė, kad mikrovielučių histerezės plotis yra jautrus temperatūrai, mechaninėms deformacijoms, mikrovielutės šerdies cheminei sudėčiai, geometrinėms charakteristikoms ir terminiam apdorojimui. Išsiaiškinta, kad mikrovielutės histerezės plotis yra įvertinamas nekontaktiniu būdu iš mikrovielutės ir žadinimo signalų. Literatūros analizė parodė, kad nėra viešai publikuotų skaitmeninių signalų apdorojimo metodų leidžiančių išskirti mikrovielutės signalą iš atsako signalo bei įvertinti histerezės plotį.
2. Realių ir modeliuotų atsako signalų filtravimo rezultatai parodė, kad diskretinė vilnelių transformacija, leidžia išskirti mikrovielutės signalą iš atsako signalo. Diskretinė vilnelių transformacija efektyviai pašalina žadinimo signalo dedamąją ir triukšmą esantį atsako signale, dėl to išskirtame mikrovielutės signale pasiekiamas iki +30 dB STS padidėjimas lyginant su atsako signalu.
3. Deformacijų ir temperatūros tyrimai patvirtino, kad mikrovielutės histerezės plotis priklauso nuo deformacijų ir temperatūros poveikio. Užregistruotas histerezės pločio jautrumas siekia $4.6 \mu\text{s}/^\circ\text{C}$ ir $135 \mu\text{s}/\text{N}$. Tyrimai su modeliuotais signalais parodė, kad sukurtas histerezės pločio matavimo algoritmas leidžia įvertinti histerezės plotį su $2 \pm 6 \mu\text{s}$ absoliutine paklaida.
4. Tyrimai su realiomis mikrovielutėmis parodė, kad pagrindinė problema, trukdanti gauti atsikartojančius histerezės pločio matavimus yra histerezės pločio priklausomybės nuo nuolatinio ir kintančio magnetinio lauko stiprio. Šie veiksniai sukuria papildomą histerezės pločio dedamąją siekiančią iki $120 \mu\text{s}$, kuri sumuojasi su temperatūros ir deformacijų sukeltais histerezės pločio pokyčiais. Dėl to temperatūros ar deformacijų vertinimas remiantis vien histerezės pločio matavimais tampa nebeįmanomas. Tikėtina, kad šias problemas įmanoma kompensuoti taikant diferencinį matavimo metodą ir pasitelkiant dvi mikrovielutes: jutimo ir atraminę.

Literatūros sąrašas

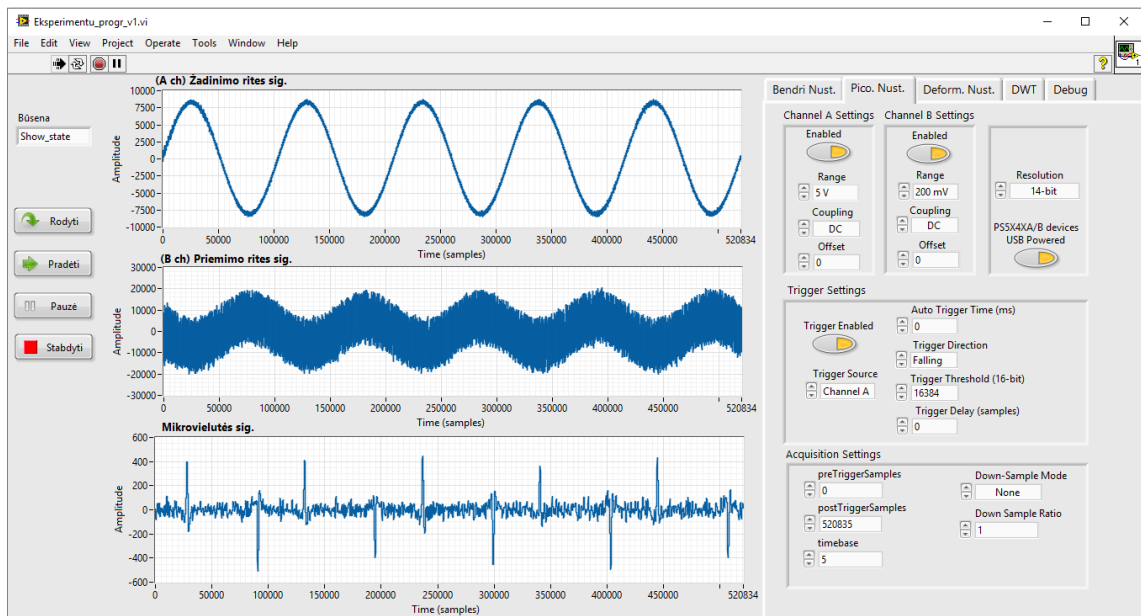
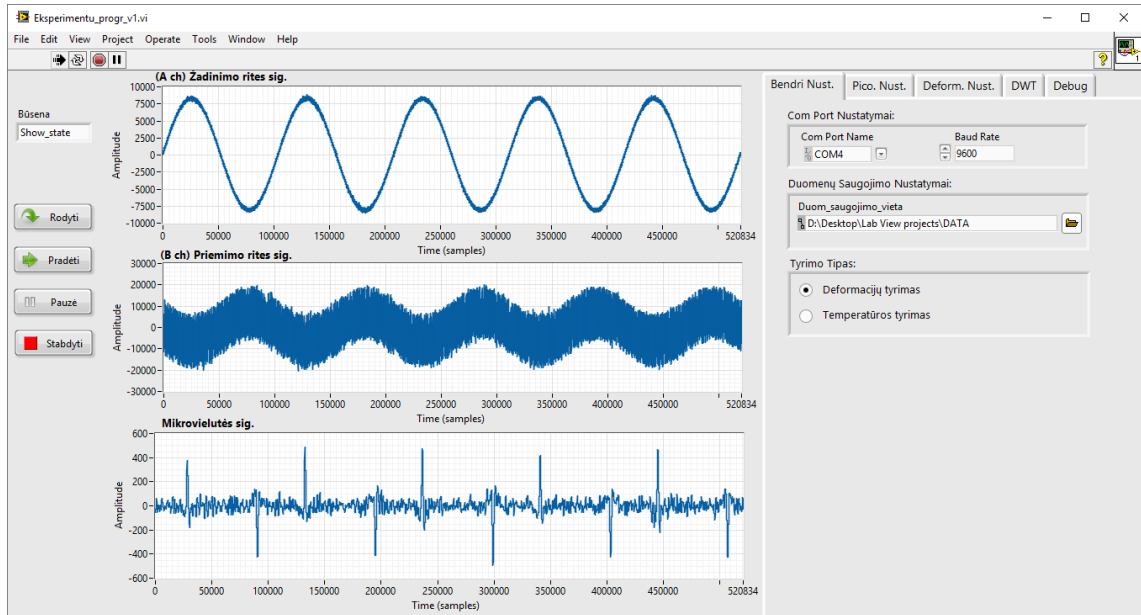
1. D. Praslicka, J. Blazek, M. Smelko, J. Hudák, A. Cverha, I. Mikita, R. Varga, and A. Zhukov, "Possibilities of measuring stress and health monitoring in materials using contact-less sensor based on magnetic microwires," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 1, pp. 128–131, 2013.
2. R. Hudak, R. Varga, I. Polacek, P. Klein, I. Skorvanek, V. Komanicky, R. P. del. Real, and M. Vazquez, "Addition of molybdenum into amorphous glass-coated microwires usable as temperature sensors in biomedical applications," *physica status solidi (a)*, vol. 213, no. 2, pp. 377–383, 2016.
3. R. Sabol, M. Rovnak, V. Bajzecerova, P. Vojtanik, and R. Varga, "Application of magnetic microwires for sensing stresses in structures," *Journal of Electrical Engineering-Elektrotechnicky Casopis*, vol. 66, no. 7, pp. 164–167, 2015.
4. V. Zhukova, M. Ipatov, and A. Zhukov, "Thin magnetically soft wires for magnetic microsensors," *Sensors*, vol. 9, no. 11, pp. 9216–9240, 2009.
5. I. Sulla, R. Sabol, P. Klein, R. Varga, and J. Gálík, "Utilizing magnetic microwires for sensing in biological applications," *J. Elect. Eng.*, vol. 66, no. 7, pp. 161–163, 2015.
6. R. Sabol, P. Klein, T. Ryba, L. Hvizdos, R. Varga, M. Rovnak, I. Sulla, D. Mudronova, J. Galik, I. I POLACEK, *et al.*, "Novel applications of bistable magnetic microwires.," *Acta Physica Polonica, A.*, vol. 131, no. 4, 2017.
7. B. Shi, Z. Li, and Y. Fan, "Implantable energy-harvesting devices," *Advanced Materials*, vol. 30, no. 44, p. 1801511, 2018.
8. V. Zhukova, J. Blanco, M. Ipatov, J. Gonzalez, and A. Zhukov, "Domain-wall propagation in thin fe-rich glass-coated amorphous wires," *physica status solidi (a)*, vol. 206, no. 4, pp. 679–682, 2009.
9. J. Olivera, M. L. Sanchez, V. M. Prida, R. Varga, V. Zhukova, A. P. Zhukov, and B. Hernando, "Temperature dependence of the magnetization reversal process and domain structure in fe 77.5-x nix si7.5 b15 magnetic microwires," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 11, pp. 3946–3949, 2008.
10. S. Baranov, V. Larin, and A. Torcunov, "Technology, preparation and properties of the cast glass-coated magnetic microwires," *Crystals*, vol. 7, no. 6, p. 136, 2017.
11. R. Sabol, M. Rovnak, P. Klein, M. Vazquez, and R. Varga, "Mechanical stress dependence of the switching field in amorphous microwires," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 1, pp. 1–4, 2015.
12. A. Zhukov, *High Performance Soft Magnetic Materials*. Springer, 2017.
13. E. Komova, R. Varga, and M. Vazquez, "Influence of thermal treatment on frequency dependence of the switching field in amorphous and nanocrystalline fenimob microwires," *Acta Physica Polonica-Series A General Physics*, vol. 118, no. 5, p. 768, 2010.

14. P. Klein, K. Richter, R. Varga, and M. Vázquez, “Frequency and temperature dependencies of the switching field in glass-coated fiber microwire,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 569, pp. 9–12, 2013.
15. R. Hudak, R. Varga, J. Hudak, D. Praslicka, I. Polacek, P. Klein, R. El Kammouni, and M. Vázquez, “Influence of fixation on magnetic properties of glass-coated magnetic microwires for biomedical applications,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 1, pp. 1–4, 2015.
16. J. Olivera, M. González, R. Varga, A. Zhukov, J. Anaya, *et al.*, “An embedded stress sensor for concrete shm based on amorphous ferromagnetic microwires,” *Sensors*, vol. 14, no. 11, pp. 19963–19978, 2014.
17. B. L. Clothier, “Magnetic element temperature sensors,” Sept. 4 2012. US Patent 8,258,441.
18. B. L. Clothier, “Microwire temperature sensors constructed to eliminate stress-related temperature measurement inaccuracies and method of manufacturing said sensors,” Dec. 15 2015. US Patent 9,212,955.
19. K. Chichaya, V. Rodionova, M. Ipatov, V. Zhukov, and A. Zhukov, “Effect of temperature and time of stress annealing on magnetic properties of amorphous microwires,” 2015.
20. R. Varga, A. Zhukov, V. Zhukova, J. Blanco, and J. Gonzalez, “Supersonic domain wall in magnetic microwires,” *Physical Review B*, vol. 76, no. 13, p. 132406, 2007.
21. J. L. Semmlow and B. Griffel, *Biosignal and medical image processing*. CRC press, 2014.
22. C.-S. Oh, “Application of wavelet transform in fatigue history editing,” *International Journal of Fatigue*, vol. 23, no. 3, pp. 241–250, 2001.
23. S. Abdullah, S. Sahadan, M. Z. Nuawi, and Z. M. Nopiah, “Fatigue road signal denoising process using the 4th order of daubechies wavelet transforms,” *Journal of Applied Sciences*, vol. 8, no. 14, pp. 2496–2509, 2008.
24. A. P. Bradley, “Shift-invariance in the discrete wavelet transform,” *Proceedings of VIIth Digital Image Computing: Techniques and Applications*. Sydney, 2003.
25. P. Corte-Leon, V. Zhukova, M. Ipatov, J. Blanco, J. Gonzalez, M. Churyukanova, J. Baraibar, S. Taskaev, and A. Zhukov, “Stress dependence of the magnetic properties of glass-coated amorphous microwires,” *Journal of Alloys and Compounds*, 2019.
26. A. Talaat, J. Alonso, V. Zhukova, E. Garaio, J. García, H. Srikanth, M. Phan, and A. Zhukov, “Ferromagnetic glass-coated microwires with good heating properties for magnetic hyperthermia,” *Scientific reports*, vol. 6, p. 39300, 2016.
27. R. Varga, J. Gamcova, P. Klein, J. Kovac, and A. Zhukov, “Tailoring the switching field dependence on external parameters in magnetic microwires,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 1, pp. 30–33, 2013.

Priedai

1 priedas. „Labview“ grafinė vartotojo sąsaja

Ši grafinė sąsaja atlieka duomenų nuskaitymo ir saugojimo funkcijas. Taip pat ji leidžia vartotojui keisti signalų registravimo nustatymus, temperatūros ir deformacijų lygį, žadinimo signalo parametrus (žadinimo signalo formą, dažnį, amplitudę).



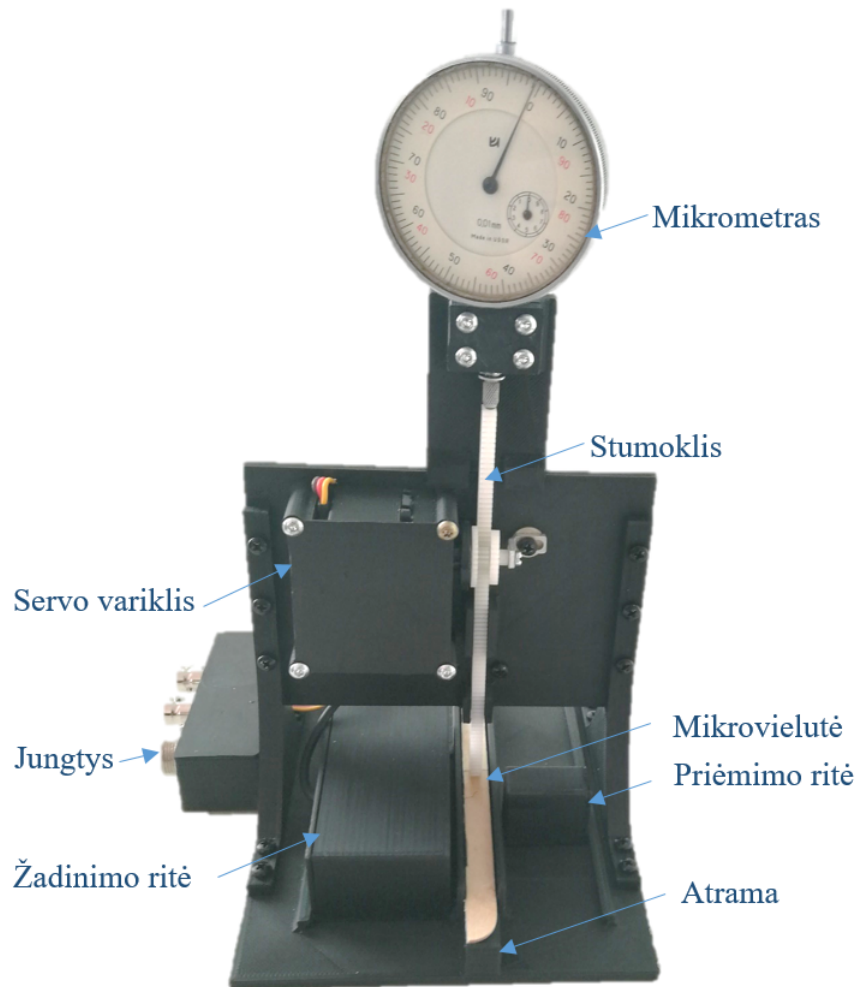
2 priedas. Temperatūrinio poveikio tyrimo standas

Šiame paveiksle pateikta kūgio formos žadinimo ritė su virš jos pritvirtintu temperatūrinio poveikio stendu ir priėmimo rite. Kūgio formos ritė dėl didelių matmenų yra tinkama stacionarių tyrimų metu, kitose situacijose priimtinesnės yra solenoido ar U formos ritės. Kūgio formos ritės struktūra pavaizduota apačioje.



3 priedas. Mechaninio poveikio tyrimo stendas

Ši sistema taikyta deformacijų tyrimų metu. Stumokliui deformuojant medinę plokštelę sukeliama mechaninė deformacija SDM. Deformacijų lygis vertintas atraminiu tenzo jutikliu bei SDM priklijuota kitoje medinės mentelės pusėje. Mikrometru vertinta stumoklio eiga. Mikrovielutė žadinama „U“ formos žadinimo rite.




4 priedas. Analoginių signalų apdorojimo sistema

Ši sistema taikyta analoginiams signalams stiprinti. Sistema leidžia stiprinti magnetinio lauko jutiklio, atsako ir žadinimo signalus. Sistema taip pat geba nuskaityti išorinių temperatūros ir deformacijų jutiklių matavimus bei kontroliuoti SDM veikiančią temperatūrą ir mechanines deformacijas.



5 priedas. Darbo viešinimas „Technorama 2019“ parodoje

Darbas pristatytas „Technorama 2019“ parodoje 2019 gegužės 9d., Santakos slėnyje, Kaune.



System For Testing Temperature And Mechanical Stress Sensors

Biomedical Engineering Institute, Kaunas University of Technology

Research team: Mindaugas Viskupaitis, Dr. Saulius Daukantas, Dr. Darius Jegelevičius,
Prof. Dr. Vaidotas Marozas,
Kaunas University of Technology, mindaugas.viskupaitis@ktu.edu

1 Relevance

- In most applications **measurement accuracy is crucial**. For this reason, scientists all over the world are developing calibration and testing systems to prevent errors
- We are presenting **fully automated** equipment for testing temperature and mechanical stress sensors.
- The **system is capable** of providing controlled stimulus (temperature, mechanical stress, or magnetic field) to the sensor as well as capturing its response.

2 Application

This system could be used for:

- Testing and calibrating temperature and mechanical stress sensors
- Testing and developing magnetic field based sensors

Main features of the system

- User-friendly graphical interface for easy access to the management of the system
- Signal processing and analysis of the data
- Data logging capability

3 System

- The "brain" of this system is Labview based **graphical user interface**, which controls all the necessary tasks required to analyze the sensors.
- Also, the interface handles **digital signal processing** of the data and denoising.
- Picoscope** is used mainly as a signal generator and a data logger.
- Analog signal processing part** does the signal amplification, reference temperature, magnetic field and stress measurements for comparison.

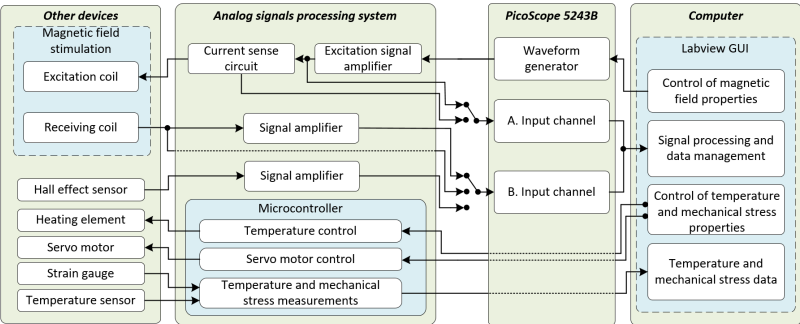


Fig. 1: Structure of the system

4 Implementation

Signal generation:

- Waveform types: harmonic, triangle, AWG
- Output frequency resolution: < 50 mHz
- AWG update rate: 200 MHz
- AWG resolution: 14 bits

Mechanical stress effect:

- Motor type: Servo
- Maximum bending force: 100 N
- Maximum piston travel distance: 9 mm
- Minimum piston travel step: 0.13 mm

Magnetic field effect:

- Sensor type: Hall effect
- Output: Analog
- Magnetic field strength sensing range: ±30 mT
- Bandwidth: 210 kHz
- Sampling resolution: 16 bits
- Measurement axis: Single
- Excitation coil type: Solenoid

Signal acquisition:

- Sampling resolution: adjustable 8, 12, 14 bit
- Bandwidths of the acquisition system: 100 MHz
- Signal sampling rate: 200 MSa/S
- Buffer memory: 64 M samples

Temperature effect:

- Temperature sensor: T type thermocouple
- Sampling resolution: 24 bits
- Temperature range: 20 – 45°C
- Average temperature increase rate: 1°C/2 min

Graphical user interface:

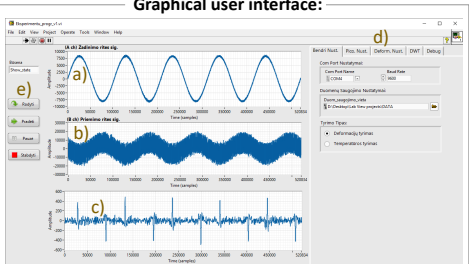


Fig. 2: Structure of the graphical user interface

Explanations:


a) Excitation signal	d) Main settings panel
b) Response signal	e) Control buttons of the interface
c) Filtered signal from the sensor	

5 Conclusions

- Our **developed system allows** users to capture the signals from temperature and stress sensors and analyze their reactions to external factors.
- Our testing system is **fully configurable** and offers software development kit. This enables **modifications and updates** if needed.
- Realization environment** is research companies and engineers who are developing temperature and mechanical stress sensors.

References

1. PicoScope 5243B specifications <https://www.picotech.com/download/datasheets/MM040.en-8.pdf>
2. Magnetic field sensor EQ731, <https://www.digikey.it/products/en?keywords=eq731>
3. AD8495, Precision Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation, https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad8494_8495_8496_8497.pdf
4. Microcontroller ADuCM360, https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuCM360_361.pdf



T
E
C
H
N
O
R
A
M
A