

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

VIKTORIJA MAČIUKIENĖ

ĮRENGINIO, SKIRTO MAGNETOREOLOGINIŲ
SKYSČIŲ PARAMETRŲ NUSTATYMOI,
SUKŪRIMAS IR TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, mechanikos inžinerija (09T)

2016, Kaunas

UDK 681.587.7+665.035.6+537.226.86](043.3)

Disertacija rengta 2008-2016 metais Kauno technologijos universiteto Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultete Gamybos inžinerijos katedroje. Mokslinius tyrimus rėmė Švietimo mainų paramos fondas ir Lietuvos mokslo taryba.

Mokslinis vadovas:

Prof. dr. Egidijus DRAGAŠIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T).

Mokslinis konsultantas:

Doc. dr. Vytautas JŪRĖNAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T).

Interneto svetainės, kurioje skelbiama disertacija, adresas:

<http://ktu.edu>

Redagavo:

Virginija Stankevičienė

© V. Mačiukienė, 2016

ISBN 978-609-02-1232-5

Turinys

ĮVADAS	5
1. LITERATŪROS ANALIZĖ IR DARBO UŽDAVINIŲ FORMULAVIMAS	9
1.1 Aktyvieji reologiniai skysčiai	9
1.1.1 Magnetoreologinių skysčių charakteristikų analizė.....	11
1.1.2 Neniutoniniai skysčiai ir jų skaitinis modeliavimas	15
1.1.3 Magnetoreologinio skysčio darbo režimai.....	18
1.2 Skysčio klampumo matavimas	26
1.2.1 Magnetoreologinių skysčių klampumo tyrimas <i>Anton Paar</i> reometru....	29
1.2.2 Magnetoreologinių skysčių šlyties modulis G	32
1.3 Pjezoelektrinių medžiagų savybės bei pjezoelektrinių vykdiklių darbo režimai	33
1.3.1 Pjezoelektrinių vykdiklių klasifikacija	36
1.4 Literatūros analizės apibendrinimas ir darbo tematikos pagrindimas.....	40
2. MAGNETOREOLOGINIŲ SKYSČIŲ REOLOGINIŲ SAVYBIŲ NUSTATYMO ĮRENGINIO SKAITINIS MODELIAVIMAS	42
2.1 Magnetoreologinio skysčio klampumo valdymui skirto elektromagneto parinkimas, modeliavimas ir analizė	42
2.1.1 Pagrindinės magnetinio kontūro skaičiavimo magnetinės lygtys.....	45
2.1.2 Magnetinių laukų skaitinis modeliavimas	49
2.2 Pjezoelektrinio keitiklio skaitinis modeliavimas	54
2.2.1 Baigtinių elementų metodo taikymas pjezokeitiklio modeliavimui	57
2.2.2 Pjezoelektrinio keitiklio skaitinio modeliavimo rezultatai	62
2.3 Skyriaus apibendrinimas.....	69
3. MAGNETOREOLOGINIO SKYSČIO REOLOGINIŲ SAVYBIŲ EKSPERIMENTINIS TYRIMAS	70
3.1 Magnetoreologinio skysčio savybių tyrimo eksperimentinis stendas.....	70
3.2 Elektromagneto magnetinių savybių nustatymas	75
3.3 Pjezoelektrinio keitiklio kontaktuojančio elemento eksperimentinis parinkimas	81
3.4 MRS reologinių parametrų eksperimentinių tyrimų metodika	87

3.5 Skyriaus apibendrinimas	96
4. PJEZOELEKTRINĖS DIAGNOSTINĖS SISTEMOS, REOLOGINIŲ SKYSČIŲ ILGALAIKIAM STABILUMUI PALAIKYTI, SUKŪRIMAS.....	97
4.1 Reologinių skysčių stabilumo tyrimas.....	97
4.2 Magnetoreologinio skysčio maišymas panaudojant daugiafunkcinę elektromagnetinę ritę.....	99
4.3 Indukcinė ritė – magnetoreologinio skysčio maišymas magnetiniu lauku ...	105
4.4 Magnetoreologinio skysčio maišymas panaudojant pjezoelektrines medžiagas	107
4.5 Skyriaus apibendrinimas.....	110
BENDROSIOS IŠVADOS	111
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	112
MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS.....	117
PRIEDAI.....	119
PRIEDAS 1	120
PRIEDAS 2	127
PRIEDAS 3	131
PRIEDAS 4.....	133

IVADAS

Temos aktualumas

Magnetoreologiniai ir elektreologiniai skysčiai (toliau – MRS ir ERS), kurie yra priskiriami aktyviųjų skysčių grupei, vis dažniau naudojami įvairiuose mechatroniniuose įrenginiuose. Naudojant šiuos skysčius gali sumažėti energijos sąnaudos ir masė, padidėti reikiami greičiai bei prietaisų tarnavimo laikas. Tokie mechanizmai vis dažniau naudojami ypač svarbiose, su gyvybės saugumu susijusiose sistemose, tokiose kaip automobilių pakabos elementai, smūgių ribotuvas ir t. t. Šie skysčiai yra labai perspektyvi ir inovatyvi medžiaga. Siekiant užtikrinti įrenginių su MRS ir ERS patikimą veikimą bei išlaikyti įrenginių, kuriuose naudojami reologiniai skysčiai puikias eksploatacines savybes (tai ypač svarbu automobiliuose, lėktuvuose ir kituose su gyvybės saugumu susijusiuose įrenginiuose), buvo sukurtos reologinių skysčių stabilumo palaikymo sistemos, reologinių savybių, tokių kaip dinaminis klampumas, šlyties įtempimai, tankio kaitos, stebėjimo bei matavimo metodikos modeliai. Yra daug konstrukcijų, kurių įrenginiuose reologiniai skysčiai yra įdiegiami sandariai, todėl mechaniniu būdu išmaišyti skysčius yra neįmanoma. Tokiais atvejais yra būtina pasinaudoti kitokio tipo reologinių skysčių stabilumo palaikymo sistemomis, t. y. į patį prietaisą įdiegti lokalias stebėjimo ir problemų šalinimo sistemas.

Reikia paminėti, kad disertacinio tyrimo metu eksperimentiškai tirti magnetoreologiniai skysčiai priklauso neniutoninių skysčių grupės viskoelastinių skysčių pograpiui, galima teigti, kad šių skysčių monitoringas ir diagnostika yra žymiai sudėtingesnė ir brangesnė nei niutoninių skysčių. Pagrindinis reologinių savybių tyrimo prietaisas yra reometras. Jis yra stacionarus, o jo kaina didelė. Šios priežastys paskatino sukurti pigius, mobilius ir lokaliai galinčius matuoti skysčių reologines savybes prietaisus.

Šiame naujausių technologijų amžiuje, kai labai sparčiai tobulinami preciziniai įrenginiai, dažnai yra keliami tokie reikalavimai: maži konstrukcijos gabaritai, greitaveika, patikimas veikimas, darbo sąlygų netolygumas, platus darbinių greičių diapazonas. Atsižvelgus į visus šiuos reikalavimus manoma, jog pjezoelektriniai keitikliai yra tam puikiai tinkanti priemonė, nes yra žinoma, kad jie gali efektyviai veikti plačiame temperatūrų diapazone, yra nejautrūs magnetiniams laukams (tai vienas pagrindinių teigiamų rodiklių tiriamuoju atveju), pasiekiami didelė jėga esant mažiems greičiams ir dar daugelis kitų teigiamų savybių.

Remiantis teigiamomis pjezoelektrinio keitiklio savybėmis buvo sukurta keletas magnetoreologinių skysčių savybių tyrimo metodų.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Šios disertacijos tikslas – sukurti patikimą, mobilų patikros įrenginį, galintį lokaliai nustatyti magnetoreologinių skysčių reologines savybes.

Šiam tikslui pasiekti iškelti uždaviniai:

1. Atlikti literatūros ir patentinės medžiagos analizę magnetoreologinių skysčių tyrimo, monitoringo bei pritaikymo galimybių aspektais.
2. Suprojektuoti specialios formos elektromagnetą, kuris efektyviai keistų magnetoreologinio skysčio klampumą nuo pradinės $B=0$ T iki maksimaliai pasiekiamos magnetinės indukcijos $B \sim 1$ T ribos.
3. Baigtinių elementų metodu iširti pjezoelektrinio keitiklio dinamines charakteristikas.
4. Sukurti ir eksperimentiškai iširti magnetoreologinių skysčių reologinių parametrų nustatymo įrenginį.
5. Sukurti parametrų tyrimo prietaisą magnetoreologinių skysčių stabilumo palaikymui panaudojant elektromagnetines rites bei pjezoelektrinius keitikius.

Metodai ir priemonės

Disertacija buvo atlikta remiantis teoriniais, analitiniais ir eksperimentiniais tyrimais. Teoriniai tyrimai atlikti naudojantis baigtinių elementų analizės *Comsol Multiphysics 4.4*. programiniu paketu. Šiuo programiniu paketu buvo skaičiuojamas elektromagneto magnetinių laukų pasiskirstymas magnetolaidyje bei *bimorfo* tipo pjezoelektrinio keitiklio veikimas. Atsižvelgiant į matematinio skaitinio modeliavimo rezultatus parinktas tinkamiausių parametrų lenkimo tipo pjezoelektrinis keitiklis, kuris yra naudojamas reologinio skysčio savybių nustatymo sistemoje. Įvertinus magnetinių laukų pasiskirstymo magnetolaidyje ir oro tarpelyje gautus rezultatus nustatyta, kad jie buvo teigiami, leidžiantys toliau sėkmingai atlikti eksperimentinius tyrimus. Aktyviųjų skysčių reologinių savybių eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti Mechatronikos Institute.

Mokslinis naujumas

- Sukurti du reologinių skysčių homogeniškumo palaikymo būdai: elektromagnetinis ir pjezoelektrinis (ultrgarsinis).
- Vienas iš sukurtų reologinių skysčių homogeniškumo palaikymo būdų yra daugiafunkcis, skirtas ne tik stabilumui palaikyti, bet ir magnetoreologiniam skysčio nuolatiniam monitoringui.
- Pjezoelektrinių medžiagų panaudojimas magnetoreologinio skysčio dinaminio klampumo vertei nustatyti.
- Suprojektuota ir pagaminta nauja elektromagneto konstrukcija, kuri atitinka keliamus reikalavimus. Oro tarpelyje tarp magneto polių išvystomas magnetinės indukcijos dydis B lygus 1 T.

- Sukurtas originalios konstrukcijos pjezoelektrinis keitiklis – jutiklis, kurio kontaktuojantis elementas sąlyčio su magnetoreologiniu skysčiu metu veikia tiesioginės šlyties režimu.

Praktinė vertė

Sukurtos dvi aktyviųjų skysčių reologinių savybių matavimo bei monitoringo sistemos. Viena jų daugiafunkcinė – skirta sedimentacijos reiškiniai nustatyti ir pašalinti. Kita, kuri yra pagrindinė disertacinio darbo dalis – magnetoreologinio skysčio dinaminio klampumo matavimo įrenginys. Naudojantis tokio tipo įrenginiais galima pakankamai tiksliai išmatuoti reologines savybes. Šių veiksmų pagrindiniai prietaisai ekonomine prasme vertinami teigiamai, nes jų praktinė vertė yra labai didelė, o kaina maža. Atraminis palyginimas reometrai, kurių kaina yra santykinai labai didelė lyginant su sukurtuoju įrenginiu.

Gynimui teikiami darbo rezultatai

1. Pjezoelektrinės diagnostinės sistemos magnetoreologinių skysčių ilgalaikiam stabilumui palaikyti darbinį charakteristikų tyrimai.
2. Magnetinių srautų pasiskirstymo magnetolaidyje tyrimo rezultatai.
3. Pjezoelektrinio keitiklio parinkimo tyrimo rezultatai.
4. Sukurto magnetoreologinio skysčio matavimo įrenginio testavimo rezultatai.

Darbo apibavimas

Moksliniai rezultatai pristatyti 3-juose Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą. Taip pat 3-juose mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidiniuose, neturinčiuose citavimo indekso. Vienuolika straipsnių paskelbta kituose recenzuojamuose mokslo leidiniuose. Gautas mokslinio išradimo Lietuvos Respublikos patentas.

Disertacijos struktūra ir apimtis

Daktaro disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, išvados, literatūros sąrašas, mokslinių publikacijų sąrašas ir priedai. Pirmajame skyriuje pateikta aktyviųjų reologinių skysčių analizė, išnagrinėti jų darbo režimai. Išsamiai išanalizuoti klampumo matavimo prietaisai bei aptartos pjezoelektrinės medžiagos, pjezoelektriniai keitikliai.

Antrasis skyrius – tyrimų metodologija. Šiame skyriuje yra pateiktas skaitinis modeliavimas. Modeliavimas susideda iš dviejų dalių: elektromagneto ir pjezoelektrinio keitiklio tyrimo *COMSOL* programa.

Trečiasis darbo skyrius skirtas eksperimentiniams tyrimams. Jame pateikiami magnetoreologinio skysčio klampumo matavimo metodikos radimo eksperimentiniai tyrimai.

Ketvirtajame skyriuje pateikti pjezoelektrinės diagnostinės sistemos reologinių skysčių ilgalaikiam stabilumui palaikyti eksperimentiniai tyrimai.

Kiekvieno skyriaus pabaigoje pateikti apibendrinimai. Darbo pabaigoje suformuluotos viso darbo išvados. Daktaro disertacijos apimtis 118 puslapių. Joje yra 115 paveikslų, 73 formulės ir 6 lentelės. Literatūros sąrašė pateikti 88 literatūros šaltiniai.

Darbe vartojami žodžių sutrumpinimai:

KE – kontaktuojantis elementas.

MRS – magnetoreologiniai skysčiai.

ERS – elektorreologiniai skysčiai.

MR – magnetoreologiniai.

LDE – angl. *Life time dissipated*.

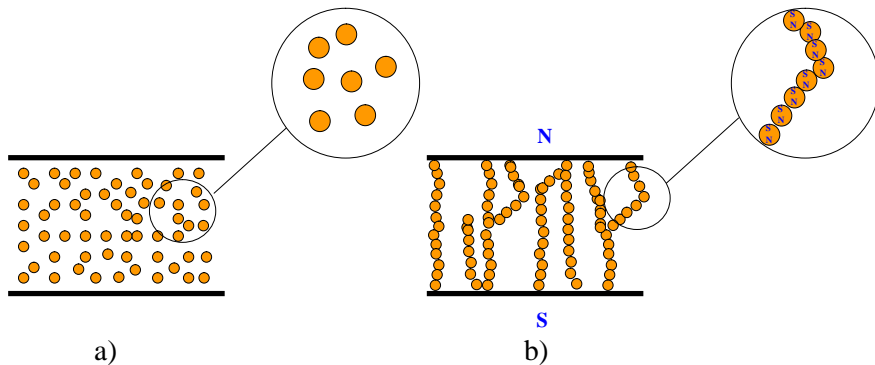
1. LITERATŪROS ANALIZĖ IR DARBO UŽDAVINIŲ FORMULAVIMAS

1.1 Aktyvieji reologiniai skysčiai

Magnetoreologiniai ir elektromagnetiniai skysčiai – tai sumamos medžiagos gebančios keisti savo būseną iš skystos į kietą jas paveikus išoriniais dirgikliais: magnetiniu ir elektriniu lauku. Šioje disertacijoje tiriami magnetoreologiniai skysčiai. [1].

MR skysčiai yra plačiai naudojami įvairiose konstrukcijose, tokiose kaip valdomi slopintuvai, stabdžiai, movos ir kt. Naudojant šiuos skysčius gali sumažėti energijos sąnaudos ir masė bei padidėti reikiami greičiai bei prietaisų tarnavimo laikas. Nors šie skysčiai yra brangūs, tačiau plečiant jų pritaikymo sritį ir tobulinant struktūrą galima sumažinti eksploatacines išlaidas [2].

Pagrindinės MR skysčio sudedamosios dalys yra įmagnetinamos mikrodalelės ir tam tikras nešantis skystis. Tai lengvai tekantys skysčiai. Pridedant magnetinį lauką, geležies dalelės įgauna dipolį magnetinį momentą, kuris susilygina su išoriniu lauku. Tuomet lygiagrečiai laukui (1.1 pav. b.) dalelės išsidėsto į linijines grandines [3].



1.1 pav. MRS veikimo schema: a-nėra magnetinio lauko; b-dalelių išsidėstymas magnetiniame lauke.

Tekant magnetoreologiniam skysčiui jos jau neteka kartu su juo ir taip stabdo ir skysčio tekėjimą. Skysčio klampumas pridėjus magnetinį lauką pasikeičia per labai trumpą laiką (kelios milisekundės) [4].

Nagrinėjant tipinių MR skysčių sandarą galima būtų teigti, kad juos sudaro apie 20–40 % plastiškų ir santykinai grynų geležies dalelių. Kaip pavyzdys galėtų būti geležies dalelės, kurios patalpintos mineraliniuose, sintetiniuose tepaluose, glikolyje arba vandenyje. Kabančių (patalpintų skystyje) dalelių magnetinio įsotinimo laipsnis leidžia nustatyti maksimalų MR skysčių klampumą. Siekiant riboti MR skysčių jėgos stiprumą, parenkamos dalelės su dideliu įmagnetinimo įsotiniu.

Vienos kokybiškiausių ir geriausiai atitinkančios įmagnetinimo įsotinimą dalelės yra geležies lydiniai ir kobaltas, kurio magnetinis įsotinimas apie 2,4 T. Tačiau norint gauti maksimalią finansinę naudą šie lydiniai netaikomi praktinėje veikloje, nes yra brangūs. Dėl šių priežasčių, siekiant didžiausio ekonomiškumo ir kokybės santykio praktikoje, paprasčiausios grynosios geležies dalelės gali būti naudojamos kaip tinkamiausios dalelės. Jų magnetinis įsotinimas lygus 2,15 T. Jei reikia gerokai silpnesnių MR skysčių, naudojamos kitų lydinių dalelės, nes metalo ir oksidų magnetinis įsotinimas yra daug mažesnis. Dažniausiai MR skysčiuose įmagnetinamų dalelių skersmuo yra nuo 3 iki 5 μm . Nors padidėjus dalelių dydžiui jų susikibimas tampa sudėtingesnis, tačiau naudojant juos praktiškai yra žinoma, kad MR skysčiai gali būti gaminami ir su didesnėmis dalelėmis. Nustatyta, jog mažesnės dalelės sukimba geriau, tačiau jos naudojamos retai dėl sudėtingos gamybos. Kaip žymiai mažesnės feromagnetinės dalelės gali būti naudojami tik oksidai, tokie kaip pigmentai yra magnetinio įrašymo laikmenose. Tokių pigmentų pagrindu suformuoti MR skysčiai gana stabilūs. Jų dalelių skersmuo tik 30 nm, tačiau tokie skysčiai turi labai ribotas jėgas ir didelį klampumą, nes dalelių magnetinis įsotinimas yra mažas [5].

Didžiausias MR skysčių gamintojas – akcinė bendrovė *Lord* (JAV). Lentelėje pateiktos pagrindinių jos gaminamų MRS charakteristikos [6].

1.1 lentelė. Magnetoreologinių skysčių fizikiniai parametrai, kuriuos pateikia pagrindinis šių skysčių gamintojas kompanija *Lord* [6]

MR skystis	MRF – 122ED	MRF – 132AD	MRF – 140CG
Išvaizda – spalva	Tamsiai pilkas	Tamsiai pilkas	Tamsiai pilkas
Klampumas (Pa s)(prie 40 °C)	0,061 ± 0,070	0,112 ± 0,020	0,280 ± 0,070
Tankis (g/cm ³)	2,32 – 2,44	2,95 – 3,15	3,54 – 3,74
Kietųjų dalelių kiekis pagal svorį (%)	72	80,98	85,44
Kietųjų dalelių kiekis pagal tūrį (%)	22	32	40
Blyksnio taškas (°C)	>150	>150	>150
Darbinė temperatūra (°C)	nuo -40 iki +130	nuo -40 iki +130	nuo -40 iki +130

Išskiriami tokie MR skysčių *privalumai* [6]:

- platus eksploatacijos temperatūrinis diapazonas (nuo -40 °C iki +130°C);
- skystis yra ne abrazyvus;
- mažas magnetinių dalelių nusėdimas;
- nesudėtingas skysčio permaišymas;
- maža reakcijos trukmė į magnetinio lauko pasikeitimus;

ir trūkumai:

- didelė skysčio kaina;
 - ilgą laiką nenaudojant skysčio jo dalelės nusėda.
- Magnetoreologiniams skysčiams keliami šie *reikalavimai:*

- MR skystis turi tenkinti aplinkosaugos reikalavimus – t. y. jis turi būti netoksiškas ir ekologiškas.
- Būtinai turi būti neabrazyvus (kad nepaveiktų vamzdžių sienelių, stūmoklių ir t. t).
- Būti mažo klampumo, kai neveikia magnetinis laukas.
- Takumo riba turi būti didelė.
- Skysta fazė ir kieta fazė turi būti kuo panašesnės savo tankiu. Dėlto dalelių nusėdimas (sedimentacija) mažesnis.
- Turi būti lengvai permaišomas.

Labai svarbus faktorius skysčiams yra temperatūros svyravimai. Klampumas yra atvirkščiai proporcingas temperatūros didėjimui, t. y. didėjant temperatūrai mažėja skysčio klampumas. Taip pat mažėja įtempimai, bet šis reiškinys yra būdingesnis ER skysčiams, o ne MR skysčiams [7].

1.1.1 Magnetoreologinių skysčių charakteristikų analizė

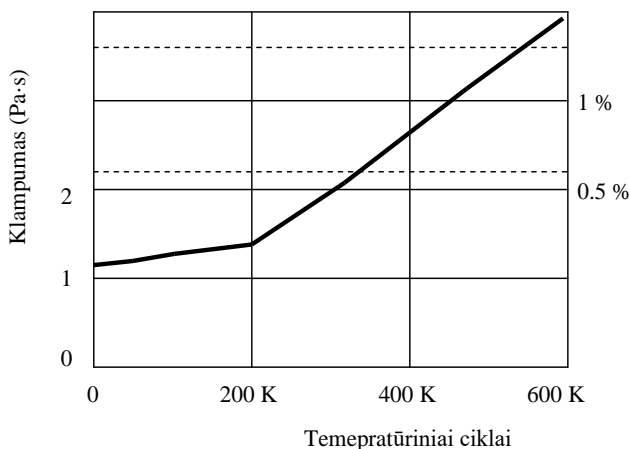
Šiuo metu magnetoreologiniai ir elektromagnetiniai skysčiai (MRS ir ERS) vis plačiau naudojami įvairiuose mechatroniniuose įrenginiuose. Dėl MRS ar ERS šie įrenginiai, lyginant su kitokiais veikimo principais veikiančiais analogais, gali būti lengvesni, kompaktiškesni matmenų ar efektyvesni. Kai kuriais atvejais leidžia sukurti visiškai naujus įrenginių tipus – tokius kaip daugkartinius didelės smūgio energijos sugėrimo bei perskirstymo įrenginius, virpesių slopinimo įrenginius ir pan. Tokie mechanizmai pradėti naudoti ypač svarbiose, su gyvybės saugumu susijusiose sistemose: automobilių pakabos elementai, smūgių ribotuvi ir t. t. [6,7].

Siekiant užtikrinti įrenginių su MRS ir ERS patikimą veikimą ir geras eksploatacines savybes (tai ypač svarbu automobiliuose, lėktuvuose ir kituose, su gyvybės saugumu susijusiuose įrenginiuose) būtina, kad skysčio reologinės savybės visą įrenginio eksploatacijos laiką išliktų vienodos. Tačiau to pasiekti įrenginiuose, kuriuose reologiniai skysčiai veikia tik tam tikrais laiko intervalais, sudėtinga. Jei įrenginys su reologiniais skysčiais kurį laiką nenaudojamas – skystyje vyksta sedimentacija – t. y. feromagnetinės dalelės laipsniškai nusėda ant indo dugno, kuriame yra reologinis skystis. Nusėdimo procesas vyksta gana sparčiai (~ 1–10 dienų), priklausomai nuo feromagnetinių dalelių dydžio, skysčio pagrindo (vandens, silikono ar alyvos), temperatūros ir t. t. [8].

Nustatyta, kad netgi ir nedidelis nusėdimas gali turėti įtaką įrenginio darbinėms charakteristikoms, kurių pokytis su gyvybės saugumu susijusiose sistemose, (pvz, lėktuvo priekinės važiuoklės slopintuve, smūgio į žemę sugėrimui ir perskirstymui lėktuvo nusileidimo metu), yra nepageidaujamas. Todėl būtina monitoringo sistema, kuri stebėtų reologinių skysčių būseną. Remiantis šios sistemos jutiklių signalais galima būtų spręsti apie reologinių skysčių homogeniškumą ir, reikalui esant, pakeisti kitus sistemos parametrus ar įjungti skysčio darbingumo atstatymo įrenginius, kad būtų išvengta avarių [8].

Magnetoreologiniai skysčiai praranda tam tikras, jų kokybę lemiančias savybes, kitaip tariant pradeda tirštėti, todėl pastaruoju metu kuriant skysčius, siekiama taikyti įvairias technologijas, kurios padėtų pagerinti skysčių sandarą ir galima būtų plačiau

juos taikyti. Galima paminėti ir daugiau reiškinių, susijusių su magnetoreologiniuose skysčiuose pasireiškiančiu susidėvėjimu. Tobulėjant skysčio sandarai ir plėtėjant pritaikomumo spektrui, magnetoreologiniuose skysčiuose pasireiškia susidėvėjimo faktorius. MR skysčio susidėvėjimo forma pasireiškia nepageidaujamu tirštėjimu. Atsiranda ir daugiau nepageidaujamų reiškinių, bet jie neturi tokios didelės įtakos skysčio kokybei. Apibendrinant galima teigti, kad nesvarbu kokį neribotą garantinį laiką turėtų skystis, tačiau jo naudojimas dirbant įvairiomis skirtingomis sąlygomis gali neatitikti jam keliamų reikalavimų [9]. Kaip pavyzdį galima paminėti skysčio, kuris pagamintas silikono alyvos pagrindu fizines savybes. Nustatyta, jog jos esant aukštai temperatūrai ar ilgam eksploatavimo laikui dirbant keičiasi – skystis ima tirštėti. Skysčio fizinių savybių pablogėjimas paprastai priklauso nuo atsiradusios šlyties jėgos, darbinės temperatūros padidėjimo ir periodinės darbo trukmės [9].



1.2 pav. Klampumo priklausomybė didėjant temperatūrai [8]

MR skysčių gyvavimo matas yra išreiškiamas išsklaidytos energijos kiekiu tam tikrame tūrio vienetu. LDE (angl. *Lifetime Dissipated Energy*), t. y. ilgaamžiškumas – išsklaidymas – energija) [9].

$$LDE = \frac{1}{V} \int_0^{trukmė} P \cdot dt,$$

(1.1)

kur P – momentinė mechaninė galia, kuri MRS prietaisuose paverčiama šiluma; V – tūris; t – laikas.

Vadinasi, MR skysčio LDE yra paprasta mechaninė energija, kuri išsiskiria tam tikrame tūrio vienetu. Šios formuluotės atskleidžia MR skysčio, naudojamo prietaisuose, gyvavimo trukmę. Iš atliktų laboratorinių tyrimų ir per ilgą laiką stebint veikiančius prietaisus pagrįstai nustatyta, kad geriausios sudėties MR skysčių LDE = 107 J/cm³. Kai viršijama ši LDE riba, skystis yra nebetinkamas eksploatuoti, jis neatitinka fizinių savybių [9].

Magnetoreologiniai skysčiai yra gaminami iš tam tikros „nešančiosios“ medžiagos ir magnetinių dalelių. Į jų sudėtį įeina medžiagos su dideliu magnetiniu įsotinimu. Tokių dalelių esminis privalumas, kad joms esant MR skystis įsimagtina per kelias milisekundes. Pavyzdžiui, geležies pentakarbonido (Fe(CO)₅) medžiaga yra chemiškai gryna (≥99.7%) – t. y. ji beveik neturi priemaišų. Tokios sudėties magnetinės dalelės turi rutulio formą. Dėl tokios formos galima išvengti anizotropijos, dalelės nėra abrazyvios. Priemaišos medžiagą sukietina, todėl ji tampa mechaniškai patvaresnė, atsiranda pasipriešinimas dislokacijai. Ši medžiaga tinkama todėl, kad jos magnetinis įsotinimas yra tinkamas tokių skysčių sudėčiai (~2,1T esant 21°C) [10].

Dažnai naudojamas lydinys, toks kaip geležies-kobalto (Fe-CO). Tokios medžiagos magnetinis įsotinimas yra ~2,43T. Šis lydinys turi trūkumą – laikui bėgant iš šių miltelių pagamintas skystis pradeda tirštėti. Mokslininkai mano, kad geriausios medžiagos yra geležies-kobalto (Fe-CO) ir geležies-nikelio (Fe-Ni) lydiniai. Šių lydinių santykinė sudėtis yra tokia: 90:10 % ir 99:1 %. Vidutinis tokių dalelių dydis dažniausiai būna 2 μm. Keramininis ferito, magnetinis įsotinimas yra ~ nuo 0,4 iki 0,6 T. Tokių medžiagų magnetinis įsotinimas yra per mažas, kad galima būtų jas panaudoti MR skysčiams gaminti.

Reikia paminėti ir tai, kad be magnetinių MR skysčio savybių yra labai svarbios ir statinės magnetinės savybės (1.3 ir 1.4 pav.). Atsižvelgiant į šias fizikines savybes galima nustatyti, kokia elektros srovė yra reikalinga prietaisuose norint sukurti reikiamą magnetinį lauką. Magnetinė indukcija skysčiuose yra nustatoma įvairiais būdais ir prietaisais, pvz., vibraciniu magnetometru ar kintamu gradiento magnetometru [10].

Labai mažo magnetinio lauko magnetinis dipolis momentas, atsirandantis MR skysčio dalelėse, paskaičiuojamas:

$$m = 4\pi R^3 \beta H, \quad (1.2)$$

$$\beta = \frac{\mu_p - \mu_f}{\mu_p + 2\mu_f}, \quad (1.3)$$

kur R – dalelės spindulys; μ_p – magnetinis santykinis dalelių laidumas; μ_f – magnetinis santykinis MR skysčio laidumas.

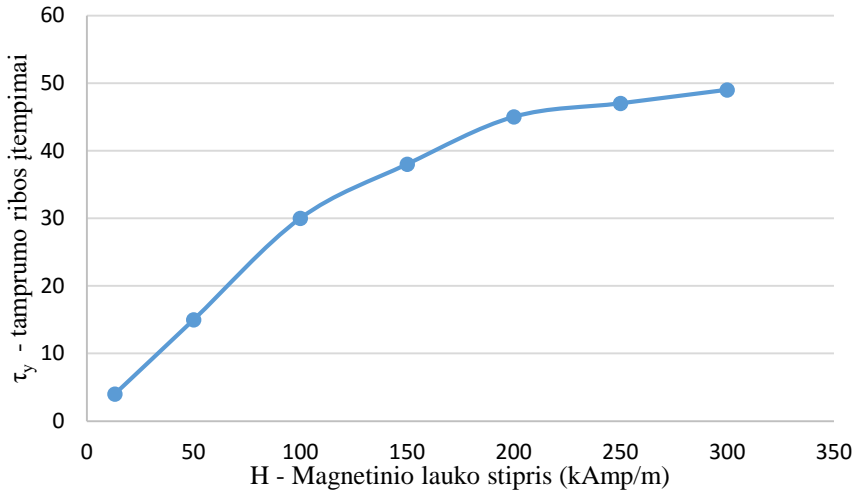
Didelio magnetinio lauko momentas apskaičiuojamas:

$$m = \frac{4}{3} \pi \mu_0 R^3 M_s \cdot \quad (1.4)$$

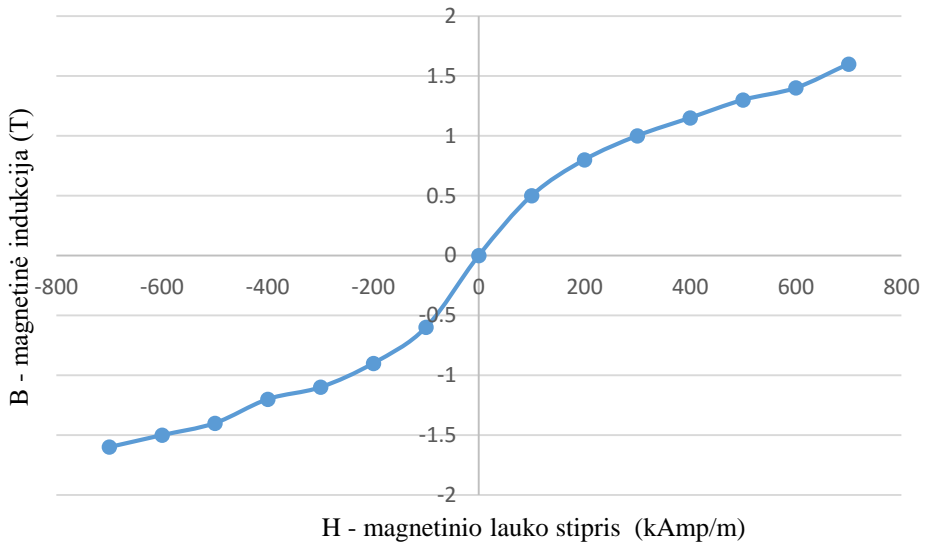
Tarp skystos skysčio būsenos ir kietos skysčio būsenos yra toks ryšys:

$$\mu_0 M_f = \phi \mu_0 M_s. \quad (1.5)$$

Kur ϕ – koeficientas parodantis santykį tarp šių dviejų būsenų; μ_0 – magnetinė konstanta.



1.3 pav. Magnetinio lauko priklausomybė nuo tamprumo ribos įtempimų [10].



1.4 pav. Tipinės magnetoreologinio skysčio magnetinės savybės. Magnetinio lauko stiprio priklausomybė nuo magnetinės indukcijos [10]

Klasikinė priklausomybė tarp magnetinio lauko stiprio ir magnetinės indukcijos išreiškiama:

$$H = \frac{l}{I}, \quad (1.6)$$

kur H – magnetinio lauko stipris, I – elektros srovės stipris, l – magnetinės linijos ilgis.

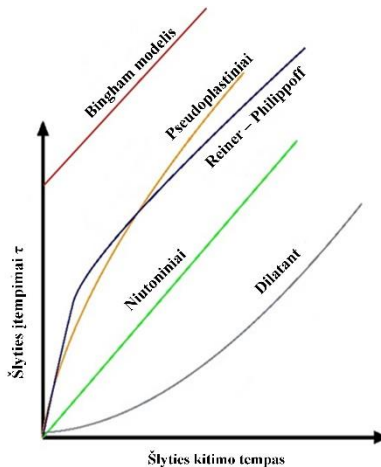
$$B = \mu_0 \mu H, \quad (1.7)$$

kur H – magnetinio lauko stipris, B – magnetinė indukcija, μ_0 – magnetinė konstanta, H – magnetinio lauko stipris [11].

1.1.2 Neniutoniniai skysčiai ir jų skaitinis modeliavimas

Skysčiai yra skirstomi į niutoninius ir neniutoninius skysčius. Esminis skirtumas tarp šių dviejų skysčių grupių atsispindi priklausomybėje: šlyties įtempimų nuo šlyties kitimo tempo (1.6 pav.). Niutoninių skysčių ryškiausias pavyzdys yra vanduo. Jų priklausomybė šlyties įtempimų nuo šlyties kitimo tempo yra linijinė. Proporcionalumo konstanta taip pat yra ir klampumo koeficientas [12].

Neniutoniniuose skysčiuose šlyties įtempimų priklausomybė nuo šlyties kitimo tempo yra nelinijinė ir gali būti priklausoma nuo laiko t , todėl yra sunku tiksliai apibrėžti skysčio klampumo koeficientą. Tinkamas pavyzdys šiam kintamam klampumui apibrėžti yra variklio alyva, kurios klampumas kinta keičiantis darbinei temperatūrai. Neniutoniniams skysčiams negalioja Niutono dėsniai. Vadinasi jų vidinės trinties neįmanoma aprašyti Niutono dėsniu. Netgi turint tokias sąlygas, kai tiek slėgis, tiek temperatūra yra nekintanti, jų klampumas nevienodas. Tokių skysčių klampumas yra priklausomas nuo tekėjimo trukmės, greičio gradiento. Vizualiai skirtumai aiškiai matomi pateiktame 1.5 paveiksle. *Bingham* modelis nuo likusių kitų (niutoniniai, pseudoplastiniai ir t. t.) skiriasi tuo, kad turi pradinius šlyties įtempimus $\tau > 0$.



1.5 pav. Niutoninių ir neniutoninių skysčių palyginimas [12]

Bingham modeliui priklausantys skysčiai nepradedą tekėti tol, kol įtempimų reikšmė neviršija takumo ribos įtempimų. Norint priversti nespūdžius skysčius tekėti yra būtina sąlyga – šlyties įtempimai. Vaizdžiai skysčių tėkmės vaizdavimas yra parodytas 1.7 paveiksle. Tiriant skysčių tėkmę skystis yra pilamas tarp dviejų plokštelių, kurių plotas yra A . Viršutinė plokštė juda greičiu V aktyvuota jėgos F , kai apatinė plokštė yra stabili ir nejudanti. Veikiant tokioms sudarytomis sąlygoms taikomos šios sąvokų apibrėžtys:

Šlyties įtempimai τ – yra apibrėžiami kaip jėga į ploto vienetą:

$$\tau = \frac{F}{A} [13]. \quad (1.8)$$

Šlyties kitimo tempas $\dot{\gamma}$ – jei greitis V yra pastovus dydis, tuomet šlyties kitimo tempas $\dot{\gamma}$ yra dviejų plokštelių greičių skirtumas padalintas iš tarpelio aukščio h .

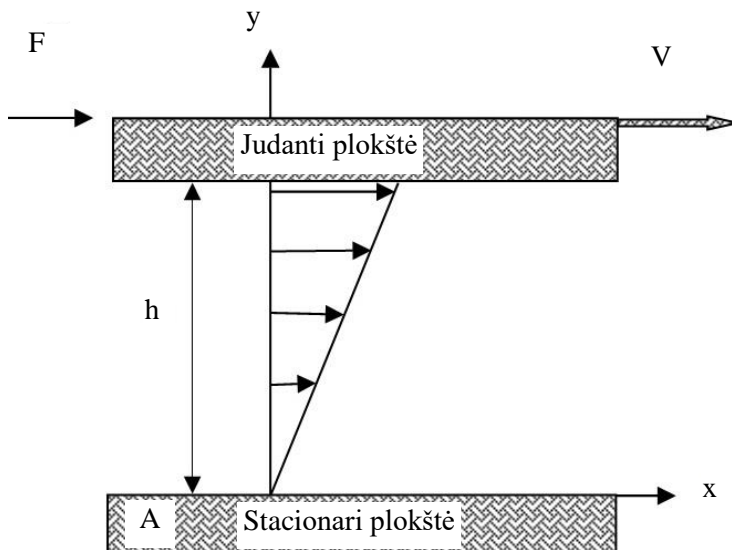
Klampumas – niutoninių skysčių klampumą apibrėžia Niutono dėsniai ir klampumo išraiška apibrėžiama:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} [13]. \quad (1.9)$$

Skysčio klampumą η apibrėžia skysčio šlyties jėgos pasipriešinimas. Ir tai yra vadinama dinaminiu klampumu. Kinematinis klampumas yra skaičiuojamas [22]:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} [13]. \quad (1.10)$$

kur ρ – medžiagos tankis kg/m^3



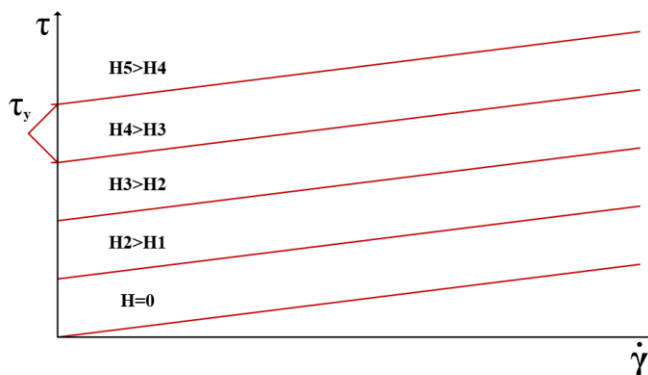
1.6 pav. Šlyties judesys skystyje tarp dviejų lygiagrečių plokštelių [14]

Magnetoreologinių skysčių reologinės savybės tiesiogiai priklauso nuo jų supančio magnetinio lauko. Šių skysčių pritaikymo sritis – valdoma pramonė. Keletas pritaikymo pavyzdžių: mechaniniai slopintuvai, stabdžiai, pavaros, movos.

Bingham modelis (1.8 pav.) yra bazinis modelis, kuriame apibūdinama magnetoreologinių skysčių elgsena. Su šiuo modeliu šlyties įtempimų pokytis $\Delta\tau$ yra tiesiškai priklausomas nuo šlyties kitimo tempo $\Delta\dot{\gamma}$ pokyčio. Taškas, kuriame šlyties kitimo tempas $\dot{\gamma}=0$ yra vadinamas takumo tašku arba įtempimų slenksčiu τ_y . Takumo įtempimai τ_y tiesiogiai priklauso nuo magnetinio lauko H .

$$\begin{cases} \tau = \tau_y + \eta\dot{\gamma} & \tau \geq \tau_y \\ \dot{\gamma} = 0 & \tau < \tau_y \end{cases} \quad (1.11)$$

Kaip jau buvo minėta, magnetoreologiniai skysčiai yra tikslingai taikomi valdomo klampumo prietaisuose. *Bingham* modelis lemia daugelio šių prietaisų kontrolę. Tačiau šis modelis nesuteikia jokios informacijos, kada magnetoreologinio skysčio būseną yra priešakuminėje skysčio įtempimų būsenoje. Šioje būsenoje negalioja šlyties įtempimų τ nuo šlyties kitimo tempo $\dot{\gamma}$ priklausomybė (kai $\tau < \tau_y$). Šis ikitakuminis režimas gali būti ištirtas taikant mikroskopinius tyrimus bei stebint skysčio būseną [14].



1.7 pav. *Bingham* modelis [15]

Skysčius taip pat galima klasifikuoti remiantis priklausomybe šlyties įtempimų nuo šlyties kitimo tempo. Skysčiai skirstomi į grupes ir pogrupius:

1 – Niutoniniai skysčiai

2 – nuo laiko nepriklausantys neniutoniniai skysčiai:

- šlyties retėjimo;
- šlyties storėjimo;
- viskoplastiniai skysčiai.

3 – nuo laiko priklausantys neniutoniniai skysčiai:

- tiksotropiniai;
- reopektiniai.

4 – viskoelastiniai skysčiai [16].

Tiriamieji magnetoreologiniai skysčiai priklauso nuo laiko nepriklausančių neniutoninių skysčių grupei, viskoplastinių skysčių pogrupiui.

Viskoplastinės medžiagos yra skysčiai, kurie yra tiesiogiai susiję su takumu. Prieš atsirandant kritiniams šlyties įtempimams skysčiuose nėra liekamosios deformacijos, tai lyg kietas kūnas. Kai šlyties įtempimų vertė pasiekia maksimalią reikšmę, skystis pradeda tekėti. *Bingham* modelio skysčiai yra speciali viskoplastinių skysčių rūšis, kuri išreiškia tiesioginę priklausomybę šlyties įtempimų nuo šlyties kitimo tempo. Tuo momentu skystis pradeda tekėti. Paminėtinas pavyzdys yra vienas iš kasdienybėje naudojamų produktų – tai dantų pasta, kuri neteka, kol nepaspaudžiama tūbelė [16].

1.1.3 Magnetoreologinio skysčio darbo režimai

Klampieji įtaisai (smūgio slopintuvai, hidrauliniai amortizatoriai, movos ir t. t.) priklauso nuo klampumo jėgų skystyje norint sugerti ar perduoti energiją. Galimybė staiga keisti klampumą leidžia beveik akimirksniu valdyti šias jėgas.

Rezultatas gali būti paprastas ir efektyvus šioms priemonėms [17]:

- aktyvioms pakaboms;
- jėgos atoveiksmiui;
- kintamo sukimo momento perdavimui;
- energijos valdymui;
- valdomiems slopintuvams;
- stabdžiams su maža trintimi.

Didžiausios jėgos, kurias gali pasiekti MR slopintuvai priklauso nuo MR skysčio ir slopintuvo dydžio. Iš esmės visi mechanizmai, kurie naudoja MR skysčius, klasifikuojami pagal veikimo pobūdį:

1. Vožtuvo režimas.
2. Tiesioginės šlyties režimas.
3. Slėgimo režimas arba visų trijų režimų kombinacija.

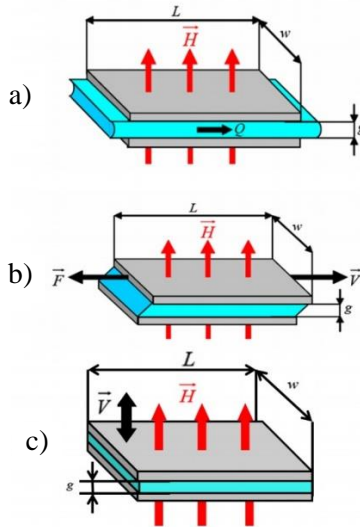
Šių režimų veikimo schemas pateiktos 1.8 paveiksle.

a) Vožtuvinio režimo mechanizmai – tai yra valdomi vožtuvai, slopintuvai ir pavaros. Dirbdamas vožtuvo režimu skystis teka tarp dviejų stacionarių polių.

b) Tiesioginės šlyties mechanizmai – movos, stabdžiai, laikikliai ir fiksavimo įtaisai. Dirbant tiesioginės šlyties režimu skysčio tėkmės pozicija yra tarp dviejų plokštelių. Viena iš plokštelių juda kitos atžvilgiu reliatyviai. Jėgos F ir judesio greičio vektoriai yra priešingų kryptų.

c) Slėgimo režimas naudojamas mažos vibracijų amplitudės slopintuvuose. Dirbant slėgimo režimu skysčio pozicija yra tarp dviejų plokščių. Plokštės juda

statmenai jų plokštumoms. Judesio greičio vektoriaus kryptis taip pat statmena plokštelių plokštumoms [18].

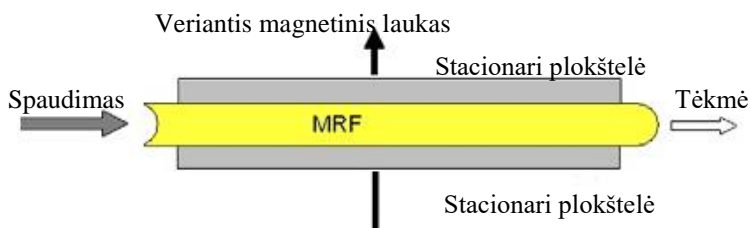


1.8 pav. Pagrindiniai valdymo režimai valdomų skysčių įtaisams [18]

Priklausomai nuo įtempimų tipo yra nustatomas darbinis prietaiso režimas. Magnetoreologiniai prietaisai tokie kaip slopintuvai ir rotaciniai stabdžiai paprastai yra labai efektingi maišymo įrenginiai. Kai stūmoklis slankioja MR slopintuve, skystis juda per tarpelius pakankamai greitai sukeldamas sūkurius ir verpetus. Jie sukeliama net tada, kai stūmoklis juda pakankamai lėtai. Panašius skysčio tekėjimus sukuria ir MR stabdžiuose atsiradęs tiesioginio poslinkio režimas. Kol MR skystis netampa kietos būsenos, įprastai, įrengimo judesiai sukelia greitą permaišymą, kuris neleidžia susidaryti MR skysčio nuosėdoms. Pavyzdžiui, mažiems MR skysčių slopintuvams, tokiems kaip *Lord Motion Master RD-1005*, užtenka dviejų ar trijų stūmoklio perstūmimų, kad skystis grįžtų į visiškai sumaišytą būseną po ilgesnio nei kelių mėnesių stovėjimo. Toliau bus aptariami keletas sukurtų MR įtaisų (stabdžių ir valdymo sistemų, kuriuose jie naudojami) [19].

Kaip jau buvo minėta, priklausomai nuo skysčio tėkmės, reologijos bei įtempimų išskiriami trys pagrindiniai darbo režimai [20]:

1 – vožtuvo arba dar kitaip vadinamas tėkmės-srauto režimas. Šis režimas (1.9 pav.) kaip darbinis režimas yra naudojamas smūgiui sugerti.



1.9 pav. Vožtuvo režimas [20]

Spaudimo – slėgimo dėmuo yra suminis dydis, klampumo komponentas ΔP_r (gryna reologija) ir magnetinio lauko (magnetoreologija) priklausomybės komponentas ΔP_{mr} . Bendroji spaudimo – slėgimo ΔP yra apibrėžiama taip [37]:

$$\Delta P = \Delta P_r + \Delta P_{mr} = \frac{(12\eta QL)}{g^3 w} + \frac{(f\tau_{mr}L)}{g}, \quad (1.12)$$

kur η (Pa s) – dinaminis klampumas; Q ($m^3 s$) srautas; L , w , g (m) geometriniai parametrai: atitinkamai ilgis, plotis ir tarpelio dydis tėkmės kanale.

Ši lygties dalis turi teorinį pagrindimą. Kita lygties dalis, kuri yra tiesiogiai priklausoma nuo magnetinio lauko ir remiasi empiriniu metodu. τ_{mr} – (N/mm^2) takumo įtempimai, jie kaip atsakas į magnetinio lauko stiprį; L , g (m) tai tie patys geometriniai parametrai; kitas faktorius f (bematis) yra empirinis faktorius ir nustatomas eksperimentiškai [20].

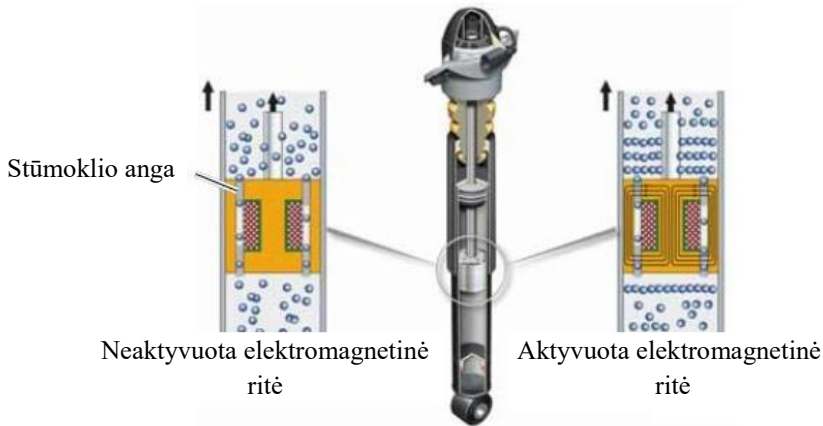
Būtina yra paaiškinti skirtumą tarp ΔP ir ΔP_r . Šis skirtumas yra tiesiogiai priklausomas nuo magnetoreologinio dydžio ΔP_{mr} . Tai yra aiški priklausomybė nuo takumo įtempimų, kurie atsiranda esant magnetiniam laukui. Taip pat yra svarbūs ir geometriniai parametrai.

Minimalus galimas skysčio tūris panaudotas sistemoje apskaičiuojamas [37]:

$$V = Lwg = \left[\frac{12}{f^2} \right] \frac{\eta}{\tau^2} \left[\frac{\Delta P_{mr}}{\Delta P_r} \right] Q \Delta P_{mr}. \quad (1.13)$$

Šis minimalus skysčio tūris reikalauja tenkinti norimą magnetoreologinį efektą esant tam tikroms tėkmės Q reikšmėms bei nurodytoms slėgimo reikšmėms.

Vožtuvinio darbo režimo pavyzdys yra slopintuvas [21].

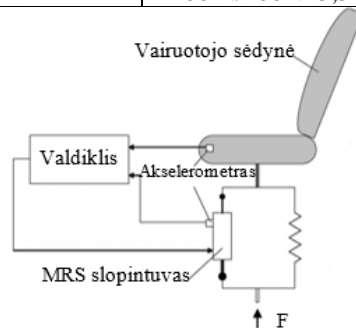


1.10 pav. Slopintuvas [21]

Šis pritaikymas yra tiesioginis slopinimo kontroliavimas magnetiniu lauku. Slopintuvas buvo vienas pirmųjų prietaisų pramonėje su magnetoreologiniu skysčiu. Slopintuvo sandara – elektromagnetinė ritė yra integruota slopintuvo stūmoklyje (1.10 pav.). Ji generuoja magnetinį lauką, kuris reguliuoja magnetoreologinio skysčio įtempimus. Naudojant šiuos paprastus mechaninius principus slopinimas tampa valdomu. Tokie slopintuvai yra pritaikyti sunkvežimių vairuotojo sėdynėse. Techninės charakteristikos pateikiamos 1.2. lentelėje.

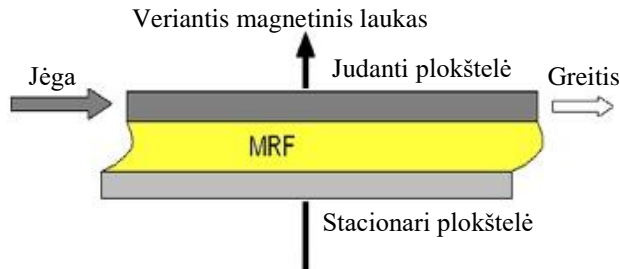
1.2 lentelė. Slopintuvo techninės charakteristikos [21]

Pritaikymas	Rheonic™ (sėdynės pakabos slopintuvas)
Darbo režimas	Vožtuvo
Šlyties įtempimų lygis	100 kPa
Šlyties kitimo tempo lygis	50.000 1/s
Geometrija	Diametras 35 mm, ilgis 100 mm
Darbinės įvesties energija	4 W (1 A, 4 V)
Darbinis galimumas	600 W
Aktyvaus skysčio tūris	0,3 ml
Visas skysčio tūris	50 ml
MRF santykis ($F_{ij}/F_{i\text{isjun}}$)	2200 N/400N=5,5



1.11 pav. Magnetoreologinio slopintuvo pritaikymo sunkvežimio sėdynėje schema [22]

2 – tiesioginės šlyties režimas. Šis režimas (1.12 pav.) yra taikomas stabdžiuose ir movose [22].



1.12 pav. Tiesioginės šlyties režimas [22]

Suminė jėga, kuri yra pasiekama esant šlyčiai, gali būti išskirstyta į klampumo (gryna reologija) komponentę F_r ir nuo magnetinio lauko priklausomybės komponentę F_{mr} . Bendra suminė šlyties jėga yra paskaičiuojama [23]:

$$F = F_r + F_{mr} = \frac{[\eta SA]}{g} + \tau A, \quad (1.14)$$

kur η (Pa s) – dinaminis klampumas; S (m/s) – reliatyvus greitis; $A=Lw$ – darbinio paviršiaus plotas; L, w, g (m) atitinkamai ilgis, plotis ir tekančio kanalo tarpelio dydis. Magnetinio lauko priklausomybės komponentė τ_{mr} (N/mm²) – takumo įtempimai tiesiogiai priklausantys nuo magnetinio lauko $A=Lw$.

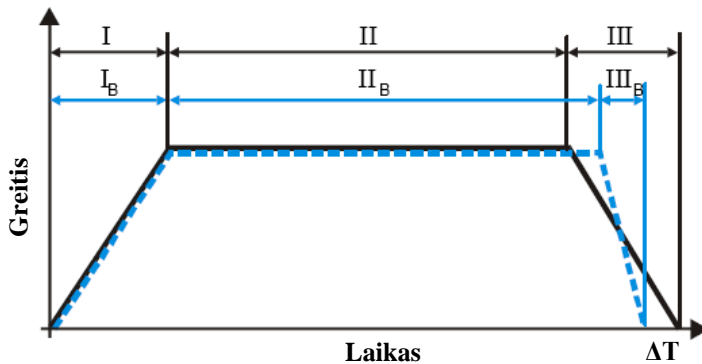
Minimalus galimas skysčio tūris panaudotas sistemoje paskaičiuojamas :

$$V = Lwg = \left[\frac{\eta}{\tau^2} \right] \left[\frac{F_r}{F_{mr}} \right] F_{mr} S. \quad (1.15)$$

Šis minimalus skysčio tūrio skaičiavimas yra skirtas norint pasiekti norimą magnetoreologinį efektą $\left[\frac{F_r}{F_{mr}} \right]$ prie duoto santykinio greičio S su tam tikru sukimosi momentu. Lengva kontrolė ir paprasta konstrukcija – tai apibūdinimas kalbant apie magnetoreologinį stabdį. Pastarieji du – vožtuvo ir tiesioginės šlyties režimai yra labai išsamiai išnagrinėti. Šiuo metu nemažai prietaisų, veikiančių tokiu režimu su magnetoreologiniais skysčiais, sėkmingai eksploatuojami pramonėje.

Magnetoreologiniams stabdžiams ir magnetoreologinėms movoms reikalingas komplektas mechaninių dalių energijai perduoti. Projektuojant ir gaminant įprastus stabdžius viena iš problemų yra dideli įrenginio gabaritai ir masė bei pasyvus tokių sistemų valdymas. Siekiant išspręsti šias problemas reikia įprastus stabdžius pakeisti magnetoreologiniais stabdžiais. Įvertinus visas magnetoreologinio skysčio teigiamas fizikines savybes galima būtų pagaminti įvairaus galingumo magnetoreologinių stabdžių (1.14 pav.). Žinant, kad šio stabdžio veikimas labai priklausomas nuo magnetinio lauko, norint sukurti magnetinį lauką galima panaudoti modeliavimo

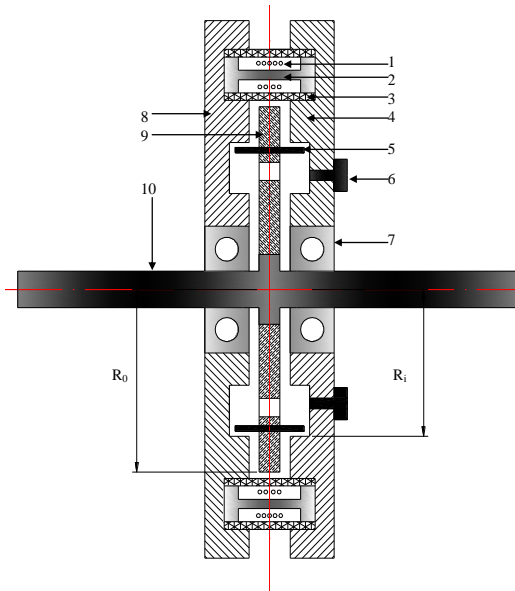
sistemas. Naudojant programą galima surasti optimalias statines – magnetines savybės. Perduodamo sukimo momento matematinėms išraiškoms užrašyti naudojamas „Bingham“ modelis. Mechaninės magnetoreologinio stabdžio charakteristikos nustatomos panaudojant specialius įrenginius ir atsižvelgiant į perduodamo sukimosi momento reikšmes [24].



1.13 pav. Magnetoreologinio stabdžio efektyvumo kreivė. Matomas stabdymo fazės sutrumpėjimas ΔT [24]

Kaip matyti iš 1.13 paveikslo, kuriame pateikiama greičio nuo laiko priklausomybė, kai greičio reikšmė didėja, MR stabdis yra išjungtas. Stabdis yra panaudojamas tik stabdymo metu. Stabdymo fazė yra daug efektyvesnė, jei panaudojame MR stabdį, nes sutrumpėja stabdymo laikas. Stabdant tik varikliu stabdymo laiko fazė yra ilgesnė. Šio darbo tikslas yra ištirti sukimo momento ir kampinio sukimosi greičio kontrolę, palyginti dvi sistemas, kaip jau buvo minėta su MR stabdžiu ir be MR stabdžio.

MR stabdžio sukimosi momentas priklauso nuo daugelio faktorių. Ypač glaudus ryšys yra su MR skysčio fizikinėmis savybėmis ir fizikiniais dydžiais, tokiais kaip dinaminiai skysčio takumo įtempiai, skysčio klampumas [25].

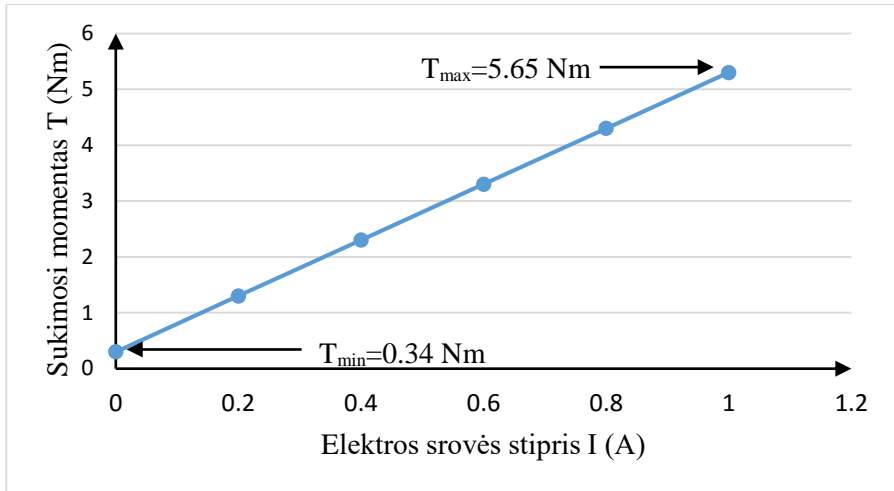


1.14 pav. MR stabdžio schema

Išsamus projektuojamo magnetoreologinio stabdžio elementų sąrašas pateikiamas 1.3 lentelėje.

1.3 lentelė. MR stabdžio elementų sąrašas

Nr.	Elemento aprašas	Elemento medžiaga
1	Ritė (apvijos skersmuo 0,25mm)	Varis
2	Ritės šerdies velenas	Mažaanglis plienas (AISI 1018)
3	Gaubtas	Aliuminio lydinys (T6-6061)
4	Dešinysis korpusas	Mažaanglis plienas (AISI 1045)
5	Maišymo smeigė	Aliuminio lydinys (T6-6061)
6	Sandaravimo kaištis	-
7	Rutulinis guolis	-
8	Kairysis korpusas	Mažaanglis plienas (AISI 1045)
9	Rotorius	Mažaanglis plienas (AISI 1045)
10	Velenas	Plienas 45



1.15 pav. Magnetoreologinio stabdžio MRB-2107-3 fizikinių parametų priklausomybė. Sukimosi momento nuo elektros srovės stiprio tiesinė charakteristika [26]

Magnetoreologinio stabdžio sukimosi momento priklausomybė nuo elektros srovės stiprio elektromagneto apvijose pateikiama 1.15 paveiksle.

Atsižvelgiant į praktines stabdžio veikimo sąlygas, bendras perduodamas sukimo momentas T_{total} susideda iš trijų komponentų: T_{fric} – tai sukimosi momentas, kuris atsiranda nuo trinties (pavyzdžiui nuo sandarinimo), T_{yd} – tai sukimosi momentas atsirandantis nuo dinaminių takumo įtempimų MR skystyje, T_{vis} – tai sukimosi momentas atsirandantis nuo MR skysčio klampumo. Bendra matematinė išraiška fizikinio dydžio T_{total} [27]:

$$T_{total} = T_{fric} + T_{yd} + T_{vis} . \quad (1.16)$$

Paskutiniai du šios išraiškos komponentai T_{yd} ir T_{vis} gali būti paskaičiuojami panaudojant integralą:

$$T_{yd} + T_{vis} = 2\pi \int_{R_i}^{R_0} (r\tau(r))rdr . \quad (1.17)$$

Sukimosi momentai T_{yd} ir T_{vis} yra gaunami iš [27]:

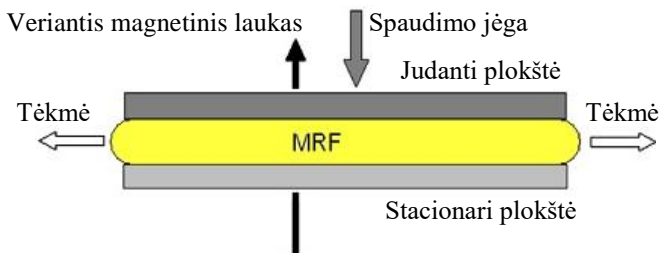
$$T_{yd} = \frac{2}{3} \pi \tau_{yd} (R_0^3 - R_i^3) , \quad (1.18)$$

$$T_{vis} = \frac{\pi \eta \omega}{2h} (R_0^4 - R_i^4) . \quad (1.19)$$

1.4 lentelė. Tiesioginės šlyties režimo savybės[28]

Pritaikymas	Rheonic™ (stabdis)
Darbo režimas	Tiesioginės šlyties
Šlyties įtempimų lygis	100 kPa
Šlyties kitimo tempo lygis	10.000 1/s
Geometrija	Diametras 92 mm, ilgis 35 mm
Darbinės įvesties energija	10 W (0,8 A, 12 V)
Darbinis galimumas	700 W
Aktyvaus skysčio tūris	5 ml
Visas skysčio tūris	5 ml
MRF santykis ($T_{ij}/T_{išjun}$)	7 Nm/0,25Nm=28

- 1 – **Slėgimo režimas.** Šis trečiasis režimas (1.16 pav.) nėra taip nuodugniai ištirtas kaip vožtuvo ar tiesioginės šlyties režimas.



1.16 pav. Slėgimo režimas [29]

Kai kurie maži amplitudės virpesių slopintuvai veikia šiuo režimu. Kai yra maži judesiai, šis režimas suteikia galimybę valdyti dideles jėgas dėl magnetoreologinio skysčio būsenos lankstumo. Didesnė takumo įtempimų riba esant magnetiniam laukui reiškia didesnę santykį tarp įjungtos ir išjungtos būsenos [20].

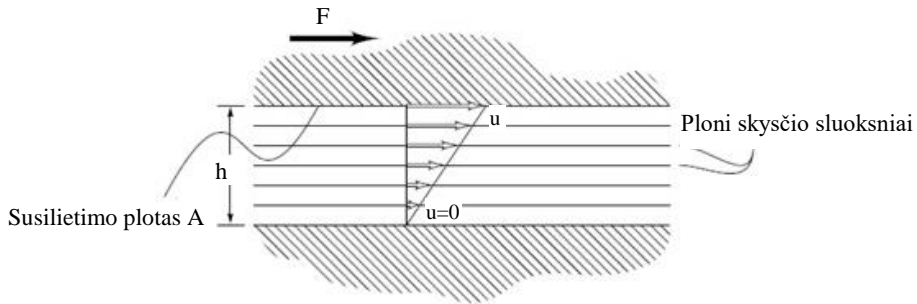
1.2 Skysčio klampumo matavimas

Skysčio klampumas – pasipriešinimas šlyties ir tempimo deformacijoms – matuojamas viskozimetru arba reometru. Klasikiniai viskozimetrai yra kapiliariniai prietaisai, o modernūs elektroniniai viskozimetrai yra paremti krentančio rutuliuko, osciliuojančio stūmoklio, vibruojančios plokštelės rotaciniu ar kitu metodu ir geba ne tik automatiškai išmatuoti, bet ir apdoroti matavimų duomenis. Reometrai naudojami tais atvejais, kai skysčio klampumas negali būti apibrėžtas viena klampumo verte ir skystis apibūdinamas pagal klampumo priklausomybę nuo išorinio parametro.

Klampumas – yra kiekybinis matas. Tai skysčio pasipriešinimas tėkmei. Klampumas būna dinaminis (arba absoliutusias) bei kinematinis.

Dinaminis klampumas – tai η – klampumo koeficientas, būdingas skysčio (dujų) prigimčiai ir savo skaitine verte lygus vidinės trinties jėgai F , kurio

susilietimo plotas lygus 1 m^2 , o greičio gradiento modulis lygus 1 s^{-1} . Minuso ženklas rodo, kad jėgos kryptis yra priešinga skysčio tėkmės kryptiai. Dinaminio klampumo SI vienetas – paskalsekundė ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) [30]. Dinaminio klampumo atskirų sluoksnių judėjimo grafinis vaizdas pateikiamas 1.17 paveiksle.



1.17 pav. Dinaminio klampumo grafinis vaizdavimas [30]

$$\eta = \frac{F}{A \left(\frac{u}{h} \right)} = \frac{\tau h}{u}. \quad (1.20)$$

Kinematinis klampumas apibrėžiamas kaip dinaminio klampumo ir skysčio tankio santykis.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (1.21)$$

Dar klampumas gali būti suvokiamas kaip atsparumo srautas tėkmei. Kuo medžiagos klampumas yra didesnis, tuo ir šis atsparumas didesnis. Klampumo matavimas yra labai svarbus inžinerijoje. Pavyzdžiui, tepalinė alyva yra tiesiogiai priklausoma nuo temperatūros pokyčių. Didėjant temperatūrai didėja ir alyvos klampumas. Neįvertinus šio parametro galima sugadinti automobilio variklį. Todėl pasitaiko atvejų, kai įrenginiuose būtina įdiegti monitoringo sistemą skysčio klampumui nustatyti. Tam yra sukurta įvairių tipų klampumo matuoklių. Dažniausiai praktikoje yra naudojami viskometrai ir reometrai.

Viskometrai yra naudojami skysčiams tirti, kurių klampumas nekinta esant įvairioms tekėjimo sąlygoms. Skirtingai nei viskometrai, reometrai yra skirti matuoti skysčius, kurių klampumas esant skirtingoms tekėjimo sąlygoms kinta. Tai lemia išoriniai veiksniai. Viskometrai dažniausiai veikia principu, kai palyginamas stacionarus objektas ir skysčio tėkmė. Dėl tokio matavimo pobūdžio viskozimetrai gali būti integruojami į įrenginius. Taip pat galimas matavimas atvirkščiu būdu – jis gali judėti stacionariame skystyje. Tėkmės srautas turi būti Reinoldso skaičiaus ribose, o skysčio tekėjimas privalo būti laminarinis. Šie veiksniai yra būtinos sąlygos tam, kad būtų gauti tikslūs klampumo matavimo rezultatai. Yra keletas pagrindinių viskozimetų tipų naudojamų laboratorijose (1.18 pav.) [31]:

U – formos vamzdelio viskozimetrai. Šie klampomačiai dažnai naudojami laboratorijose. Jais matuojamas dinaminis klampumas. Matavimo principas yra paprastas: yra stebima kiek ilgai užtrunka procesas esantis kapiliariniame U formos vamzdelyje tarp dviejų taškų. Šio vamzdelio skersmuo yra žinomas. Būtina žinoti konkrečią matuojamo skysčio tankio reikšmę tam, kad būtų galima paskaičiuoti klampumą.

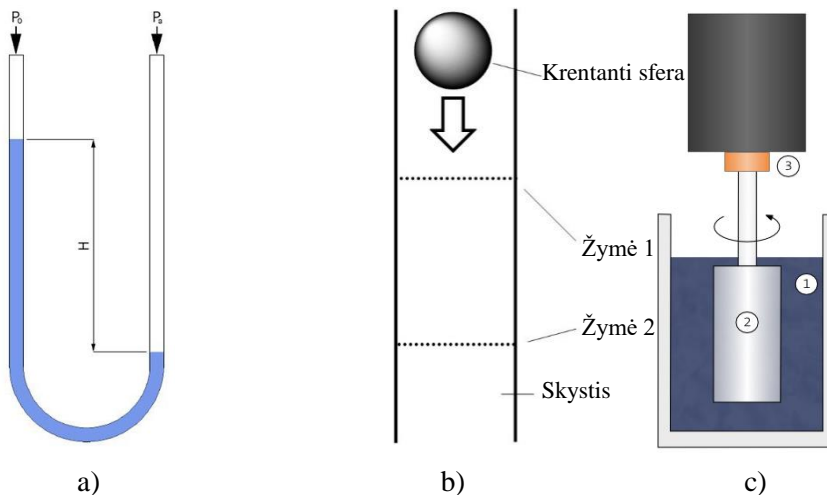
Krentančios sferos viskozimetras. Šie viskozimetrai naudoja krentantį sferinį rutuliuką klampumui pamatuoti. Išmatuojamas kritimo laikas tarp dviejų taškų. Taip pat yra žinomas sferos tankis bei radiusas. Mažiems kūnų judėjimo greičiams Dž. Stoksas (J. Stokes) nustatė, kad klampumo jėga yra tiesiog proporcinga skysčio dinaminiam klampumui, kūno judėjimo greičiui ir jo matmenims. Rutuliškiesiems kūnams ši jėga lygi [32]:

$$F = 6\pi\eta rv. \quad (1.22)$$

kur η – dinaminis klampumas, v – rutuliuko greitis, r – rutuliuko spindulys.

Sukimosi viskozimetrai. Šie viskozimetrai matuoja pasipriešinimą nuo sukimosi momento. Yra keletas tokio tipo viskozimetrų.

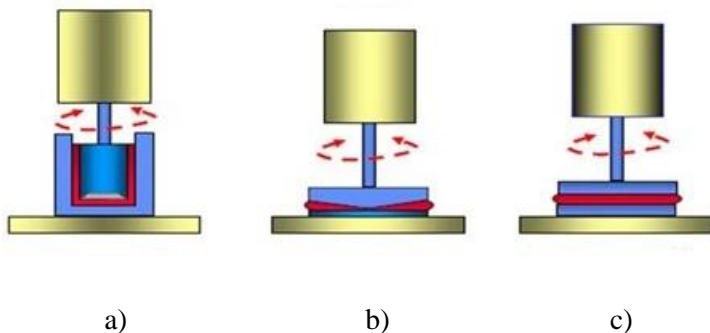
Burbuliniai viskozimetrai. Šie prietaisai išmatuoja laiką, per kurį burbulai pakyla į skysčio paviršių. Šių klampomačių matavimo trukmė yra labai trumpa, o tikslumas didelis.



1.18 pav. Keletas viskozimetrų tipų: a) U-formos vamzdelio; b) krentančios sferos; c) sukimosi viskozimetras, kuriame 1 – tiriamasis skystis, 2 – matavimo įrankis, dar kitaip vadinamas sukliu, 3 – sukimo momento matavimo prietaisais [33].

Reometrai. Šie klampumo matavimo prietaisai yra skirti neniutoniniams skysčiams matuoti. Šio tipo skysčiai nėra aprašomi tik vienu reikšminiu dydžiu. Nustatyta, kad juos sąlygoja aplinkos veiksniai, todėl ir klampumo kitimas vertinant laiko aspektu yra priklausomas nuo šių veiksnių [34].

Disertacijos pagrindinis tiriamasis objektas yra magnetoreologiniai skysčiai. Šie skysčiai būtent ir priklauso neniutoninių skysčių klasei, kurių klampumą galima išmatuoti reometru. Toliau šiame darbe bus išsamiau aptarti skirtingų reometrų veikimo principai, privalumai ir trūkumai.



1.19 pav. Skirtingos plokštelių geometrijos reometrai [34]

Reometrai veikia tokiu principu: tiriamasis skystis yra įpilamas tarp dviejų plokštelių (1.19 pav.). Plokštelių geometrija skiriasi priklausomai nuo matuojamo skysčio klampumo. Kaip matyti paveiksle (a) – tai reometras, kurio plokštelių geometrija yra koncentriniai cilindrai. Tokio tipo reometras matuoja skysčius, kurių klampumas yra nuo labai mažo klampumo iki vidutinio. Geometrija, kai viršutinė besisukanti plokštelė yra kūgio formos, o stacionari – plokštelė (b) – toks reometras skirtas išmatuoti nuo labai mažo klampumo iki itin klampių skysčių. Paveikslo (c) dalyje yra dvi lygiagrečios plokštelės: apatinė stacionari ir viršutinė besisukanti. Tokio tipo reometrais matuojami skysčiai, kurių klampumo ribos yra nuo skystų iki kietos medžiagos.

Reometrai matuoja skysčio srauto tėkmę. Tiksliau – jėgas (kaip šlytis) tiesiogiai susijusias su skysčio tėkmės fizika. Šis prietaisas tiesiogiai srauto nepamatuoja, bet išmatuoja srauto poveikį esant įvairiems slėgiams – ypač pagrindinių, tokių kaip šlyties srautas.

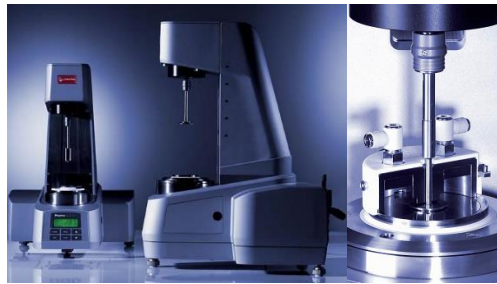
Reometrai yra dviejų tipų: *rotaciniai arba šlyties reometrai* bei *ištęstiniai reometrai*. Mūsų tiriamuoju atveju aktualūs yra rotaciniai reometrai, kurie bus aptarti nuosekliau.

Disertacijos tiriamasis objektas yra magnetoreologiniai skysčiai. Jiems matuoti yra naudojamas rotacinis reometras, kurio matavimo „galva“ yra dvi lygiagrečios plokštelės, tarp kurių yra įpilamas magnetoreologinis skystis [35].

1.2.1 Magnetoreologinių skysčių klampumo tyrimas *Anton Paar* reometru

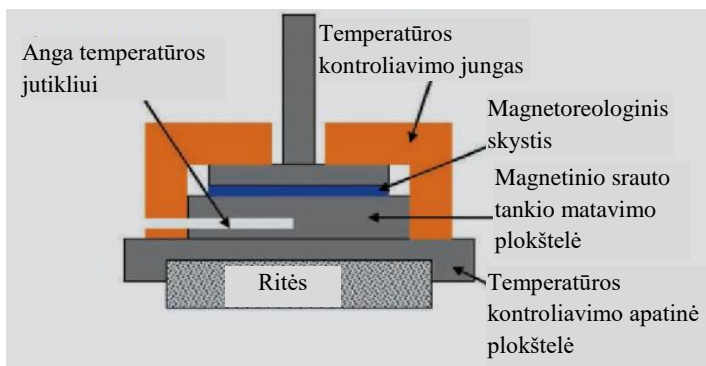
Tiriamajoje dalyje yra pateikti magnetoreologinio skysčio tyrimų rezultatai. Trijų tipų *Lord* kompanijos (MRF – 140CG ir MRF – 122ED) bei sukurtas naujos kartos magnetoreologinis skystis (MCI) buvo tiriamas *Anton Paar MCR 301* reometru

(1.20 pav.). Šis prietaisas veikia būdu, kuris, kaip pavaizduotas 1.19 (c dalyje) paveiksle, kai tarp dviejų lygiagrečių plokštelių yra įpilamas tiriamasis skystis [36].

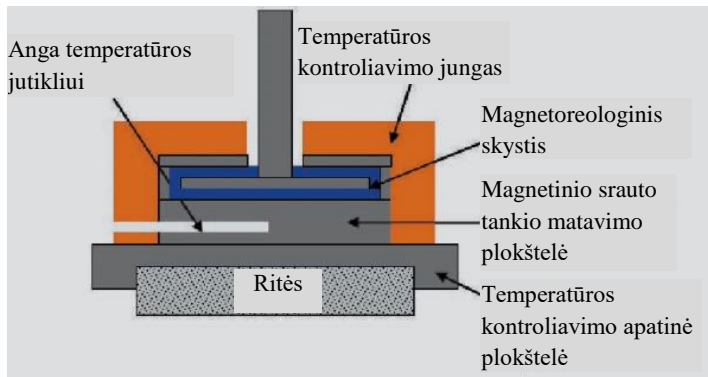


1.20 pav. Anton Paar MCR 301 reometras [36]

Pagrindinis šio prietaiso privalumas – magnetoreologinis skystis gali būti tiriamas ne tik pradinėje statinėje savo būsenoje, kada nustatomi pradiniai parametrai, bet ir tada, kai jis, veikiamas magnetinio lauko keičia savo klampumą. Reometre yra integruotos elektromagnetinės ritės bei temperatūros palaikymo aušinimo sistema. Tai reiškia, kad skysčius galima tirti esant tam tikrai norimai, tačiau vienodai temperatūrai. Su šiuo prietaisu magnetinio lauko indukcija didėja nuo 0 T iki 1T oro tarpelyje. Skysčio temperatūros kontrolinis elementas yra integruotas apatinėje plokštelėje. Toje pačioje plokštelėje yra ir elektromagneto apvijos. Magnetinio lauko linijos yra orientuotos statmenai plokštelėms. Lygiagrečių plokštelių sistema yra pagaminta iš nemagnetinio metalo. Temperatūra gali kisti iki 70 °C. Lygiai tokiose pačiose ribose kinta ir tiriamojo skysčio temperatūra. Šiame reometre yra įdiegta programinė įranga, kuri kontroliuoja magnetinį lauką ir įrašo svarbius parametrus. Tokiais atvejais, kai norima pasiekti didesnę magnetinio lauko indukciją, yra naudojama dvigubo tarpelio geometrija ir reikšmė padidėja iki 1,3 T. Atliekant eksperimentinius tyrimus su dviejų tipų magnetoreologiniais skysčiais (MRF – 140CG ir MRF – 122EG) pakako ir pirminio reometro su viengubo tarpelio sistema [37].



a)

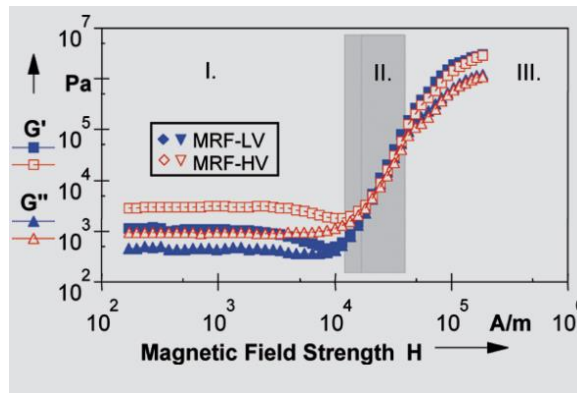


b)

1.21 pav. Reometro schema: a) su viengubu tarpeliu, kai magnetinio lauko indukcija siekia iki 1T; b) su dvigubu tarpeliu, kai magnetinio lauko indukcija siekia iki 1,3 T [38]

Reometro, pateikto 1.21 paveiksle ypatybės:

- Reologiniai matavimai magnetiniame lauke iki 1 T, dvigubo tarpelio konstrukcijoje iki 1,3T.
- Tiesioginiai magnetinio lauko matavimai informaciją perduodant į programinę įrangą, kurioje duomenys yra apdorojami, skaičiuojami reikiami dydžiai.
- Temperatūros valdymas nuo 20 °C iki 70 °C.
- Patentuota dvigubo tarpelio sistema.



1.22 pav. Priklausomybė šlyties modulio G nuo magnetinio lauko stiprio.

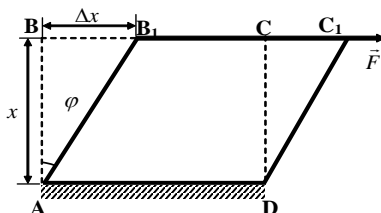
Paveiksle 1.22 pateiktas kompanijos *Lord* gaminamo magnetoreologinio skysčio grafikas yra padalintas į tris sritis: I – vidinė skysčio tėkmė; II – magnetinis laukas didėja ir vidiniuose magnetoreologinio skysčio sluoksniuose formuojasi grandinė, kurios pradeda blokuoti skysčio tėkmę; III – magnetoreologinio skysčio

magnetinių dalelių grandinėlės užblokuoja skysčio tėkmę. Matavimai atlikti palaipsniui didinant magnetinį lauką [39].

1.2.2 Magnetoreologinių skysčių šlyties modulis G

Kiekvienas kūnas veikiamas išorinių jėgų keičia savo matmenis ir formą, t. y. deformuojasi. Kūnui deformuojantis pakinta nuotoliai tarp jį sudarančių dalelių. Šiam nuotolio pakitimui priešinasi dalelių sąveikos jėgos (elektromagnetinės prigimties), todėl deformuotame kūne atsiranda išorinei jėgai priešingos krypties vidinės tamprumo jėgos: $\vec{F}_{isor.} = -\vec{F}_{tampr.}$. Deformacijos vadinamos tamprėmis, jei nustojus veikti jėgomis, kūnai įgyja pradinius matmenis ir formą [40].

Kūnų deformacijos gali būti įvairios, tačiau pagrindinės yra šios: tempimo bei gniuždymo, lenkimo ir šlyties.



1.23 pav. Šlyties deformacijos schema [40]

Gretasienis ABCD, kurio pagrindas AD įtvirtintas, veikiamas paviršiumi BC liestine jėga \vec{F} , deformuojasi ir įgauna pavidalą AB_1C_1D . Jėgos veikiami kūno sluoksniai vienas kito atžvilgiu pasislenka. Daugiausia pasislenka viršutinis sluoksnis (dydžiu Δx), o apatinis lieka vietoje. Šios rūšies deformacija vadinama šlyties deformacija.

Taip deformuoto kūno vidinį tangentinį įtempimą τ randame padaliję tangentinę jėgą F iš kūno viršutinio paviršiaus (BC) ploto S , t. y. $\tau = F/S$. Santykinė deformacija $\varepsilon = \Delta x/x$. Pagal Huko dėsnį:

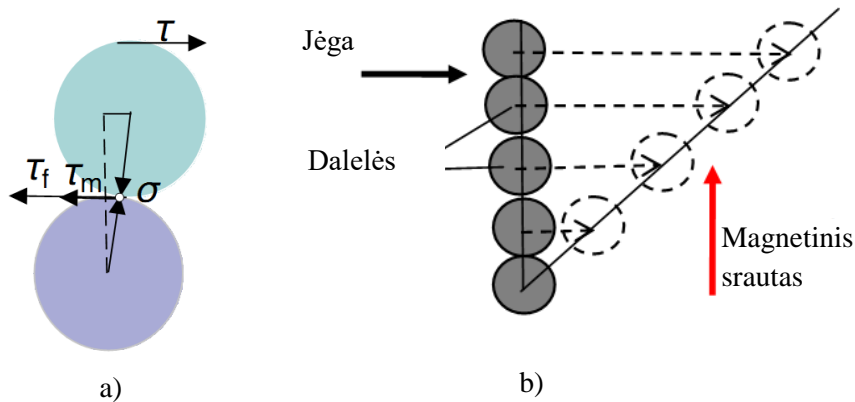
$$\tau = G \Delta x/x, \quad (1.23)$$

kur G – šlyties modulis, priklausantis nuo medžiagos atsparumo šlyties deformacijai. Tačiau $\Delta x/x = tg\varphi$. Kadangi Huko dėsnis galioja tik mažoms deformacijoms, tai kampas turi būti nedidelis. Todėl $\Delta x/x = tg\varphi \approx \varphi$. Įrašę τ ir $\Delta x/x$ reikšmes į Huko dėsnio išraišką (2) gauname [41].:

$$F/S = G \varphi. \quad (1.24)$$

Šiuo atveju Huko dėsnis nusakomas taip: tangentinis įtempimas yra tiesiog proporcingas šlyties kampui φ .

Jeigu $\varphi = 1 \text{ rad}$, tada $G = F/S$, t. y. šlyties modulis skaitine verte yra lygus vidiniam tangentiniam įtempimui, kai šlyties kampas lygus 1 rad.



1.24 pav. Geležies dalelių sąveika bei išsidėstymas tyrimo metu, kai veikia magnetinis laukas: a) dviejų feromagnetinių dalelių sąveika magnetoreologiniame skystyje; b) scheminis feromagnetinių dalelių deformacijos vaizdas [42]

Paveikslo 1.23 (a) dalyje aiškiai matyti vektoriniai įtempimų pasiskirstymas. Kaip jau žinoma, τ – šlyties įtempimai, τ_m – nuo magnetinio lauko atsiradęs įtempimas, τ_f – trinties įtempimas, σ – normalinis įtempimas nuo kurio priklauso taškinis dviejų dalelių sukibimas. Feromagnetinės grandinėlės (b), atskirai kiekviena jų, deformuojasi vienodu atstumu. Šis modelis yra gana paprastas. Priklausomai nuo šlyties įtempimų dydžio grandinėlės gali stipriai deformuotis arba nutrūkti [43].

1.3 Pjezoelektrinių medžiagų savybės bei pjezoelektrinių vykdiklių darbo režimai

Pjezoelektrinis efektas labai daug kur taikomas garsiakalbiuose ir skambučiuose, dujų degikliuose. Daugelis žadintuvų nebegaminami su elektromagnetiniu skambučiu, nes pjezoelektrinė keramika daug kompaktiškesnė ir pigesnė. Pjezoelektrinės keramikos platus panaudojimo spektras [44].

Pjezoelektrinė keramika naudojama mechaninius poveikius, tokius kaip slėgis ir pagreitis, gali paversti juos į elektrinę energiją arba atvirkščiai – elektrinę energiją paversti į mechaninę. Pjezoelektrinė keramika naudojama įvairiuose keitikliuose, kurie gali veikti įvairiu dažnių diapazonu. Medžiagos, kurios pasižymi pjezoelektriniu efektu, būna natūralios ir dirbtinės [45].

Pjezoelektriniai keitikliai turi ir trūkumų: nejautrumą statiniams dydžiams, jų savybės labai priklauso nuo tvirtinimo prie matuojamo objekto būdo, aplinkos temperatūros ir darbo trukmės. Juos reikia kalibruoti dinaminėmis apkrovomis. Tačiau be paminėtų trūkumų, šie keitikliai turi ir daug privalumų: jie gali būti labai maži ir lengvi, todėl juos patogiu naudoti, jie pakankamai atsparūs aplinkos poveikiams ir t. t., taip pat gaminami didelėmis serijomis, todėl yra gana pigūs [46].

Pjezoelektrinė keramika priskiriama feroelektrinių medžiagų grupei. Feroelektrikais vadinami poliniai dielektrikai, kurie tam tikrame temperatūros intervale poliarizuojasi savaime, t. y. nesant išorinio elektrinio lauko. Atrasti polikristaliniai feroelektriniai lydiniai – bario titanatas, cirkonio titanatas, kurie pasižymi geresnėmis fizikinėmis savybėmis nei natūralios medžiagos, tokios kaip kvarcas, turmalinas ir kt. Pjezokeramikos panaudojimo būdų yra labai daug, daugiausia ji naudojama keitikliuose. Paveiksle 1.25 pateikiama įvairių formų pjezokeramika [47,48].

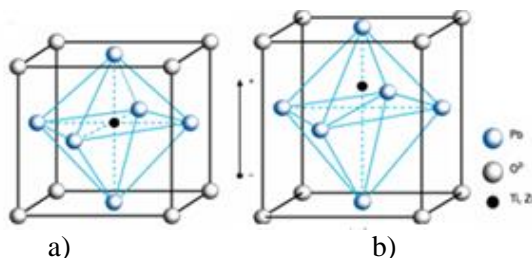


a)

b)

1.25 pav. Pjezoelektrinė keramika: a) PI kompanijos įvairiausių formų pjezo elementai; b) iš jų pagaminti pjezovykdikliai [49]

Prieš poliarizaciją pjezokristalas turi simetrinę kristalinės gardelės formą. Žemiau Kiuri temperatūros gardelės struktūra yra deformuota ir nesimetrinė, kaip pavaizduotas pavienis kristalas 1.26 pav.



a)

b)

1.26 pav. Cirkonio titanato kristalas: a) aukščiau Kiuri temperatūros b) žemiau Kiuri temperatūros [50]

Esant normalioms darbo sąlygoms poliarizuotoje keramikoje, kaip ir pjezoelektriniuose kristaluose, egzistuoja linijinės priklausomybės tarp tamprumo ir

deformacijos komponentų, taip pat tarp elektrinio lauko ir elektrinės indukcijos komponentų. Šios linijinės priklausomybės išreiškiamos konstantomis, kurios įeina į priklausomybes, matricinę formą aprašančias galimus pjezoelektrinių struktūrų elektromechaninius sąryšius [51]. Trumpai galima užrašyti:

$$S = s^E T + d_t E, \quad S = s^D T + g_t D, \quad (1.25)$$

$$D = +d T + \varepsilon^T E, \quad E = -g T + \beta^T D, \quad (1.26)$$

$$T = c^E S - e_t E, \quad T = c^D S - h_t D, \quad (1.27)$$

$$D = e S + c^S E, \quad E = -h S + \beta^S D, \quad (1.28)$$

kur: S – tamprioji deformacija (santykinis pailgėjimas),

T – tamprumas (tamprioji įtampa),

E – elektrinis lauko stipris,

D – elektrinė slinkties indukcija,

s, c – tamprumo konstantos,

ε – dielektriškumo konstantos,

β – atvirkštinės dielektriškumo konstantos,

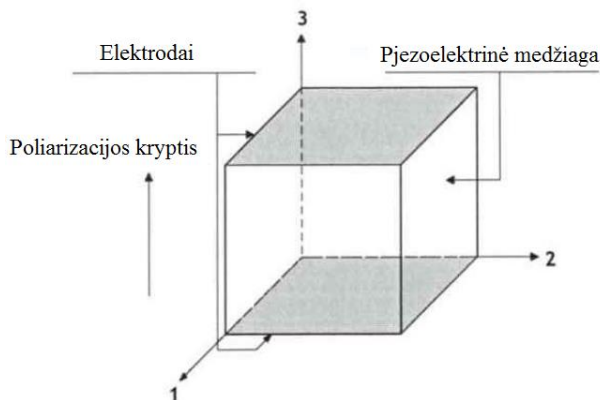
d, g, e, h – pjezoelektrinės konstantos.

Indeksas t reiškia transformuotą matricą. Viršuje užrašyti indeksai reiškia dydžius, kurie laikomi pastoviais – E, D, T ar S .

s^E yra tamprumo konstanta, kuriai esant elektrinis laukas yra nekintantis arba lygus nuliui, ε^T yra dielektriškumo konstanta, kuriai esant tamprumas yra pastovus arba lygus nuliui [52].

Lygtys (1.47) ir (1.49) aprašo atvirkštinį pjezoelektrinį efektą, o lygtys (1.48) ir (1.50) tiesioginį pjezoelektrinį reiškinį.

Dėl anizotropinių pjezoelektrinės keramikos savybių, pjezoelektrinių vykdiklių darbo režimai priklauso nuo jų poliarizacijos krypties ir pridėto elektrinio lauko krypties. Siekiant nustatyti kryptis pjezoelektrinės keramikos elemente, naudojama trijų ašių koordinatinių sistema. Ašys žymimos skaičiais 1, 2 ir 3. Naudojama koordinatinių sistema yra analogiška klasikinei X, Y ir Z ašių sistemai (1.27 pav.) [53].



1.27 pav. Pjezoelektrinės medžiagos orientacija koordinatinių sistemoje [53]

Yra įprasta, kad trečiosios ašies kryptis sutampa su pjezoelektrinės keramikos poliarizacijos kryptimi. Poliarizacijos kryptis sutampa su 3 koordinatinių sistemos ašimi, o elektrodai jai statmeni. Gaminant įvairios formos pjezokeraminius elementus jų poliarizacijos kryptis sukuriama paveikus elektrodus nuolatine aukštos įtampos elektros srove. Prie elektrodų prijungus elektros įtampą, atsiradęs elektros laukas sukuria du skirtingus pjezoelektrinės keramikos deformacijos režimus:

1. Pjezoelektrinės medžiagos pailgėjimą 3 ašies atžvilgiu. Šio pailgėjimo priklausomybę nuo elektros lauko krypties apibūdina d_{33} deformacijos režimas.
2. Pjezoelektrinės medžiagos susitraukimą 1 ir 2 ašių atžvilgiu. Šio susitraukimo priklausomybę nuo elektros lauko parodo d_{31} deformacijos režimas.

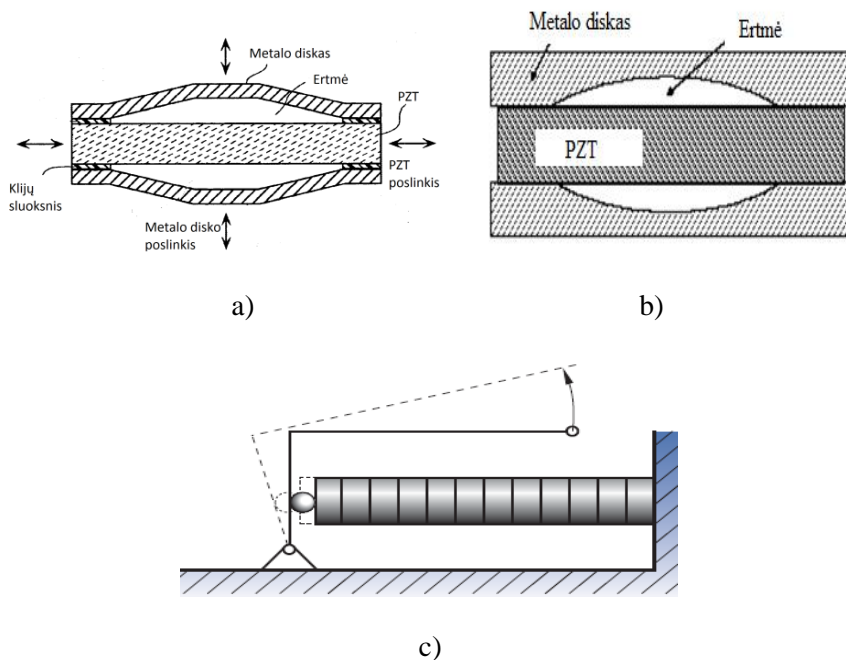
Pavyzdžiui, Pz26 pjezoelektrinei keramikai šie koeficientai yra $d_{33}=420 \cdot 10^{-12} \text{m/V}$, o $d_{31}=-180 \cdot 10^{-12} \text{m/V}$. Šie koeficientai parodo, kad paveikus pjezoelektrinę keramiką elektros lauku, 3 kryptimi gaunami beveik dvigubai didesni poslinkiai nei kryptimis 1 ir 2 [54].

1.3.1 Pjezoelektrinių vykdiklių klasifikacija

Naudojami vykdikliuose įvairių formų pjezoelektriniai elementai yra kietos būsenos medžiagos su neribota skyra, kuri šiuo metu labiausiai priklauso nuo pjezoelektrinius vykdiklius valdančios elektroninės aparatūros galimybių. Siekiant sumažinti pjezoelektrinio elemento valdymo įtampas (siekiančias iki 2 kV/mm) ir padidinti jų poslinkius, šiuo metu sukurta pjezoelektrinių vykdiklių, kuriuose panaudota daugiasluoksni pjezoelemento konstrukcija [55].

Tačiau kai kuriais atvejais dešimčių μm poslinkių nepakanka. Tokiu atveju gali būti naudojami bimorfo tipo vykdikliai, kurie susideda iš kelių suklijuotų plonų pjezoelektrinių ir elastinių plokštelių. Veikiant pjezoelektrinių plokštelių plėtimuisi-susitraukimui visame vykdiklyje sužadamos lenkimo deformacijos. Šio tipo gembiskai įtvirtinti vykdikliai gali sukurti didelį (kelių šimtų μm) lenkimo poslinkį, tačiau jie pasižymi gana ilgu reakcijos laiku (1 ms) ir nedidele jėga (1 N).

Siekiant išgauti tarpines daugiasluoksnių vykdiklių ir lenkimo deformacijų vykdiklių savybes buvo sukurtas specialios konstrukcijos vykdiklis, vadinamas „Moonie“ arba lietuviškai „lėkštės“ tipo. Šis vykdiklis sukuria didesnį poslinkį nei daugiasluoksni pjezoelektrinis vykdiklis ir daug didesnę jėgą bei greitesnę reakciją už bimorfą (1.28 pav.) Dėl tokios konstrukcijos, PZT diskui susitraukiant ir vėl išsitempant radialine kryptimi, gaunami metalo disko poslinkiai, kurie yra daug didesni nei PZT disko generuojami poslinkiai. Metalo diskų poslinkiai yra statmeni PZT disko poslinkiams, o jų dydis priklauso nuo geometrinių ir vykdiklyje naudojamų medžiagų parametrų [55].



1.28 pav. Pjezoelektriniai vykdikliai su išoriniu stiprinimu: a) „Moonie“, b) „Cymbal“ ir c) sverto tipo poslinkio stiprinimas [56]

Pavarose pjezoelektriniai vykdikliai naudojami dėl [56]:

- nanometrines skyros poslinkio;
- didelės greitaveikos;
- didelės išvystomos jėgos.

Pjezoelektriniai vykdikliai skirstomi į grupes pagal poslinkio stiprinimą, formą, atliekamą poslinkio dydį, tikslumą, deformacijos tipą:

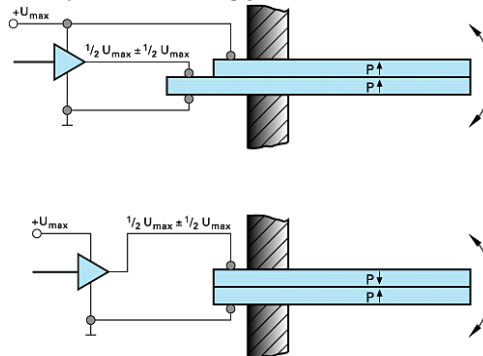
- vidinio stiprinimo daugiasluoksniai;
- didelio tikslumo su lenkiamomis kreipiamosiomis;
- didelio poslinkio su išoriniu stiprinimu ir lenkiamomis kreipiamosiomis;
- šlyties vykdikliai;
- cilindro formos vykdikliai;
- lenkiamieji pjezoelektriniai vykdikliai;
- hibridiniai pjezoelektriniai vykdikliai (papildomai panaudotos ir kito tipo pavaros).

Lenkimo deformacijų pjezoelektriniai vykdikliai

Pjezoelektrinių lenkimo deformacijų vykdiklių judesys gaunamas dėl pjezoelektrinio sluoksnio pailgėjimo. Tokie vykdikliai susideda iš dviejų ir daugiau sluoksnių (bent vienas iš jų turi būti pjezoelektrinės keramikos sluoksnis). Jie poliarizuoti taip, kad šalia esantys sluoksniai ilgėtų-trauktųsi į priešingas puses.

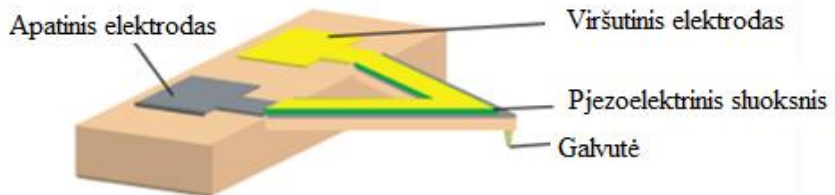
Priešingi pjezoelektrinių sluoksnių pailgėjimai sukuria vidinį lenkimo momentą, panašų į lenkiamų strypų. Siekiant vykdklio stabilumo, jo konstrukcijoje gali būti naudojami ir pasyvūs armuojantys sluoksniai. Daugelyje tokių vykdklių pjezoelektrinis sluoksnis ilgėja per visą vykdklio ilgį (1.29 pav.).

Pirmą kartą tokie vykdkliai buvo atrasti 1930 m. Jie pasižymi dideliais poslinkiais, tikslumu ir greitaveika, todėl naudojami robotų konstrukcijose, optikos įrenginiuose bei virpesių valdymo technologijose [57].



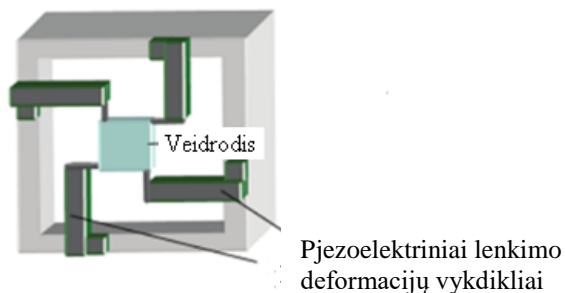
1.29 pav. Pjezoelektrinis lenkimo deformacijų vykdklis, kurio sudėtyje naudojami 2 pjezoelektrinės keramikos sluoksniai lygiagretaus ir nuoseklaus jungimo schemose [66]

Pjezoelektriniai lenkimo deformacijų vykdkliai labai plačiai taikomi skenavimo įrenginiuose. Vienas tokių pavyzdžių yra atominės jėgos mikroskopai, skirti paviršiams skenuoti (1.30 pav.) [58].



1.30 pav. Pjezoelektrinių lenkimo deformacijų vykdklių panaudojimas atominio mikroskopo konstrukcijoje [58]

Kitas lenkimo deformacijų vykdklių panaudojimo pavyzdys pateiktas 1.31 pav., kuriame pavaizduota veidrodėlio valdymo sistema. Įrenginiai, kuriuose naudojami pjezoelektriniai lenkimo deformacijų vykdkliai pasižymi greitaveika ir tikslumu. Daugelyje tokių įrenginių veidrodėliai gali atlikti vienos ar dviejų krypčių judesius, tačiau yra ir tokių sistemų, kuriuose naudojami deformuojami veidrodėliai.



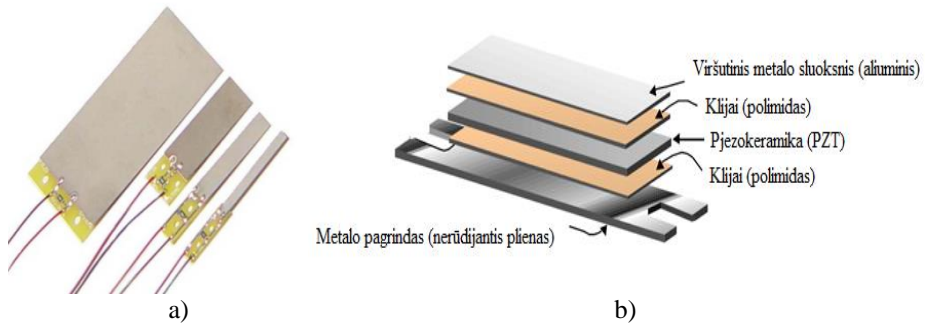
1.31 pav. Pjezoelektriniai lenkimo deformacijų vykdikliai veidrodėlio valdymui skenavimo sistemoje [59]

Lenkiamų pjezoelektrinių vykdklių yra keli tipai: unimorfai (naudojamas vienas pjezoelektrinės keramikos sluoksnis), bimorfai (naudojami du pjezo sluoksniai) ir daugiasluoksniai. PI kompanija gamina PICMA lenkiamus daugiasluoksnius pjezoelektrinius vykdklius, kurių poslinkis siekia iki 2 mm ir pasiekama jėga iki 2 N, o reakcijos laikas siekia kelias milisekundes. Šie daugiasluoksniai pjezoelektriniai lenkimo tipo vykdkliai sudaryti iš apytiksliai 50 μm storio sluoksnių, tarp kurių įterpti sidabro-paladžio elektrodai (1.32 pav.) [60,61].



1.32 pav. Daugiasluoksnis PICMA lenkiamas pjezoelektrinis vykdklis [61]

JAV kompanija „Piezo Systems“ siūlo lenkiamus pjezoelektrinius vykdklius (1.33 pav.), kurie yra lengvai įtvirtinami ir su elektronine schema, kurioje yra varža, apsauganti vartotoją nuo pjezoelektrinio vykdklio iškrovos. Šie vykdkliai gali pasiekti poslinkį iki 1,26 mm [62].



1.33 pav. Piezo Systems lenkimo deformacijų vykdikliai: a) daugiasluoksnis ir b) „Thunder“ tipo pjezoelektriniai vykdikliai [63]

Pagal savo formą lenkimo vykdikliai gali būti plono strypo, vamzdžio, disko ir kitokie. JAV pagal specialią technologiją kompanijos „Face International Corp.“ yra gaminami „Thunder“ tipo vykdikliai. Tai lanko formos lenkimo vykdikliai, pasižymintys geromis amplitudinėmis charakteristikomis [64].

Atlikus pjezoelektrinių vykdiklių analizę tolimesniems skaitiniams ir eksperimentiniams tyrimams yra pasirenkamas lenkimo deformacijų vykdiklis, kuris bus tiriamas tiek analitiškai, tiek eksperimentiškai.

1.4 Literatūros analizės apibendrinimas ir darbo tematikos pagrindimas

Atlikus išsamią literatūros apžvalgą paaiškėjo, kad aktyvūs magnetoreologiniai skysčiai yra plačiai naudojami įvairiose sistemose bei mechanizmuose. Šių skysčių pritaikymo sritis yra labai plati. Dauguma kūrėjų šiuos skysčius tiria ir taiko konkrečiose praktinio pritaikymo sistemose ar mechanizmuose, tokiuose kaip magnetoreologiniai stabdžiai, movos, slopintuvai ar kt. Tačiau nedaug rasta tiriamųjų darbų apie aktyviųjų skysčių sudėties gerinimą, neigiamų savybių – sedimentacijos šalinimą, skysčių reologinių savybių sekimą tam tikromis specialiomis sąlygomis. Dažnu atveju kyla poreikis aktyviųjų skystį patikrinti lokaliai panaudojant mobilių prietaisų. Būtent tai ir paskatino sukurti keletą naujų, originalių skysčio monitoringo bei diagnostikos metodų. Išnagrinėjus literatūros šaltinius nebuvo rasta atliktų tyrimų, kuriuose pjezoelektriniai keitikliai, kurie skystyje veikia tiesioginės šlyties režimu, yra naudojami magnetoreologiniams skysčiams tirti. Konkrečiam tyrimui jie yra labai tinkami dėl savo savybės – nejautrumo magnetiniams laukams. Šie keitikliai literatūros šaltiniuose yra minimi kaip priemonė niutoniniams skysčiams tirti.

Tolimesni tyrimo etapai:

1. Suprojektuoti specialios formos elektromagnetą, kuris efektyviai keistų magnetoreologinio skysčio klampumą nuo pradinės $B=0$ T iki maksimaliai pasiekiamos magnetinės indukcijos $B \sim 1$ T ribos.
2. Matematinio modeliavimu ir eksperimentiniais metodais pagrįsti magnetoreologinių skysčių reologinių parametrų matavimo metodologiją.

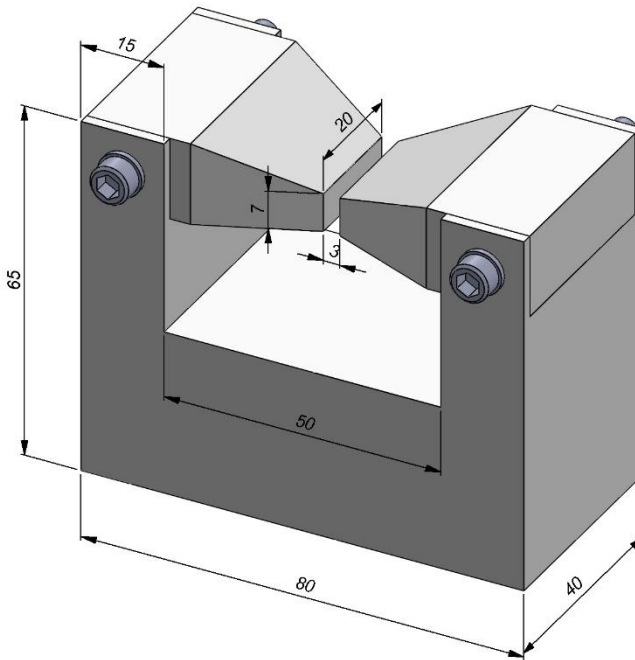
3. Sukurti ir ištirti magnetoreologinių skysčių reologinių parametrų (skysčio klampumas, sedimentacija) tyrimo metodą panaudojant pjezoelektrines medžiagas.
4. Sukurti parametrų tyrimo sistemą magnetoreologinių skysčių stabilumui palaikyti panaudojant elektromagnetines rites ir pjezoelektrinius keitiklius.

Atlikus išsamią mokslinių tyrimų analizę pirmas mokslinio tyrimo etapas yra suprojektuoti ir pagaminti magnetinio lauko kūrimo šaltinį, kuris sugeneruotų siaurame oro tarpelyje reikiamą magnetinės indukcijos dydį $B \sim 1T$. Šis dydis yra nustatytas ir pasirinktas pagal nagrinėjamų ir naudojamų eksperimentiniuose tyrimuose magnetoreologinių skysčių techninius reikalavimus.

2. MAGNETOREOLOGINIŲ SKYSČIŲ REOLOGINIŲ SAVYBIŲ NUSTATYMO ĮRENGINIO SKAITINIS MODELIAVIMAS

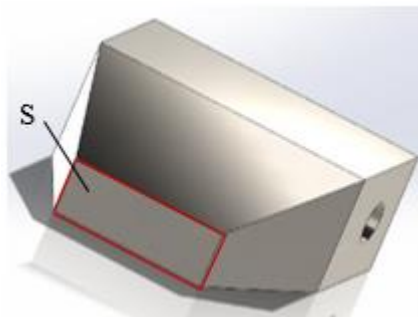
2.1 Magnetoreologinio skysčio klampumo valdymui skirto elektromagneto parinkimas, modeliavimas ir analizė

Magnetoreologinio skysčio klampumo kaita vyksta nuo išorinio magnetinio lauko. Paveiksle 2.1 yra pateikiamas magnetolaidžio projektinis vaizdas ir geometriniai parametrai, kuriais remiantis buvo atliktas magnetinės indukcijos skaičiavimas.



2.1 pav. Magnetolaidžio geometriniai parametrai. Matmenys milimetrų eilės

Geometriniai magnetolaidžio poliaus parametrai oro tarpelyje (7mm x 3mm x 20mm) pasirinkti atsižvelgiant į tiriamąjį magnetoreologinio skysčio tūrį ir talpą, į kurią jis pilamas eksperimento metu ir kurio tūris siekia 0,4 ml. Todėl projektuojant magnetolaidžių poliaus geometriją ir formą buvo remiamasi tūriniu skysčio dydžiu.



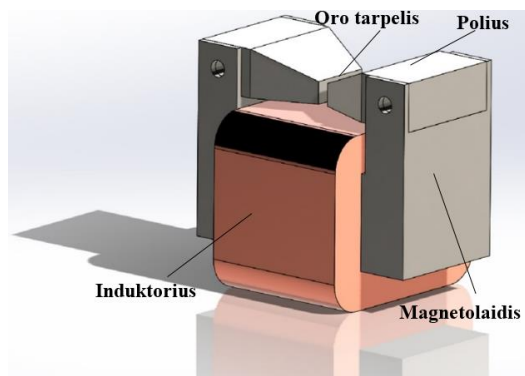
2.2 pav. Magnetinio poliaus ribos tarpelio skerspjūvyje. S – efektyvus magnetinio poliaus plotas

Tiriamuoju atveju, kuriamo magnetinio lauko šaltinis yra specialios formos ir geometrijos elektromagnetas (2.1 pav.), kuris buvo suprojektuotas ir pagamintas parenkant parametrus, tinkančius tiriamajai sistemai. Iškeltas uždavinys – pagaminti elektromagnetą, kuris siaurame 3mm tiriamajame tarpelyje sugeneruotų magnetinės indukcijos dydį $B \sim 1\text{T}$. Prie šios magnetinės indukcijos reikšmės iki galo susiformuoja magnetoreologinis efektas. Taip ir buvo išspręstas uždavinys, kad siaurame ir mažų parametrų tiriamajame magnetiniame tarpelyje sukuriama santykinai didelė magnetinės indukcijos reikšmė.

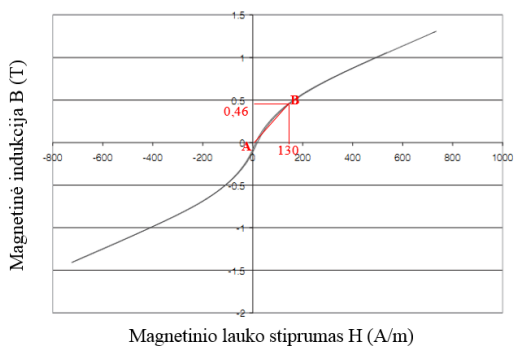
Speciali elektromagneto forma bei efektyvusis plotas S yra pateikiamas 2.2 paveiksle. *SolidWorks* projektavimo programa suprojektavus elektromagnetą ir paskaičiavus jo sukuriamą magnetinės indukcijos dydį, toliau atliekamas magnetinių laukų skaitinis modeliavimas, kuriuo bus tiriamas magnetinių laukų pasiskirstymas visame magnetolaidyje.

Disertacijos 2.3. paveiksle yra vaizduojamas trimatis elektromagnetinės ritės vaizdas. Elektromagnetinė ritė projektuota *SolidWorks* 3D inžinerinių sprendimų paketu. Pagrindinės elektromagneto techninės charakteristikos yra pateikiamos 2.1 lentelėje.

Visas elektromagnetinės ritės reikšminis magnetinis ilgis $L_m=280$ mm, reikšminis skerspjūvio plotas (oro tarpelyje) $S_m=100$ mm², apvijų skaičius ritėje $N=725$. Magnetinė grandinė yra charakterizuojama magnetine skvarba μ . Magnetinė skvarba apibūdina medžiagos savybę, jos gebėjimą stiprinti magnetinį lauką. Tiriamuoju atveju magnetolaidis pagamintas iš plieno AISI 1018. Plieno magnetinė skvarba yra gaunama sprendžiant pagrindines magnetines lygtis. Svarbūs yra du reiškiniai: magnetinio lauko dydis oro tarpelyje (3,5 mm) bei magnetinio lauko dydis magnetoreologiniame skystyje, kuriuo yra užpildomas tas tarpelis. Kaip žinoma, magnetoerologinis skystis turi netiesines magnetines savybes. Analizuojant magnetines savybes nustatytos magnetinio lauko indukcijos ribos $0\text{T} < B < 0,45\text{T}$, kuriose magnetinės indukcijos ir magnetinio lauko priklausomybės kreivė B-H yra beveik tiesiška pateiktai 2.4 paveiksle kreivei.



2.3 pav. Erdvinis elektromagnetinės ritės vaizdas



2.4 pav. Kompanijos *Lord* gaminamo magnetoreologinio skysčio MRF – 122ED įsimagnetinimo kreivė B – H [65]

Pagrindinio magnetoreologinių skysčių gamintojo kompanijos *Lord* skysčio MRF – 122ED santykinė magnetinė skvarba yra $\mu_{122MRF}=2.8$. Pažymėtoje srityje (2.2 pav.) yra tyrinėjama būseną iki magnetinio įsisotinimo, kur magnetinio lauko indukcija B ir magnetinio lauko stipris H turi tiesinę priklausomybę. Taip pat šiame regione, kai oro tarpelis yra užpildytas magnetoreologiniu skysčiu, ribinis šlyties įtempimų slenkstis τ_y yra tiesiogiai proporcingas magnetinio lauko stipriui H.

2.1 lentelė. Pagrindinės elektromagneto charakteristikos

Magnetolaidžio medžiaga	Plienas AISI 1080
Oro tarpelyje naudojama medžiaga	MRF – 122ED ir MRF – 140CG
Apvijų skaičius	725
Apvijų medžiaga	Varis
Elektros srovės ribos	Nuo 0A iki 3A
Maksimalus magnetinės indukcijos dydis	Apie 1T

2.1.1 Pagrindinės magnetinio kontūro skaičiavimo magnetinės lygtys

Ampero dėsnis susieja magnetinį srautą Φ , magnetinę varžą R , elektros srovę I ir elektromagneto ritės apvijų skaičių N [66]:

$$\Phi = \frac{NI}{R} . \quad (2.1)$$

Magnetinis srautas, kai magnetinės indukcijos vektorius \vec{B} statmenas plokštumai, taip pat dar apibrėžiamas [67]:

$$\Phi = BS . \quad (2.2)$$

Magnetinė varža R apibrėžia pasipriešinimą magnetinio lauko prasiskverbimui. Tolygioje magnetinėje grandinėje varža R yra apskaičiuojama [67]:

$$R = \sum_i \frac{l_i}{\mu_0 \mu_i S_i} , \quad (2.3)$$

kur l_i – tai ilgis magnetinio kontūro; μ_i – santykinė magnetinė skvarba; S_i skerspjūvio plotas μ_0 magnetinė skvarba vakuume, kurios reikšmė yra konstanta ($\mu_0=4\pi 10^{-7}$ H/m). Santykinė magnetinė skvarba μ_i yra santykis tam tikros medžiagos μ_{mr} (tiriamuoju atveju magnetoreologinio skysčio su magnetine skvarba vakuume μ_0) [67]:

$$\mu_i = \frac{\mu_{mr}}{\mu_0} . \quad (2.4)$$

Taip gaunama bendra visos grandinės magnetinė varža [67]:

$$R_{suminė} = R_{oro tarpelio} + R_{šlyties plokštelės} + R_{mr skysčio} + R_{magnetinio potiaus} \quad (2.5)$$

Magnetiniai dydžiai H ir B yra nuo laiko nepriklausomi ir susieti šiomis išraiškomis [67]:

$$B_i = \mu_i \mu_0 H . \quad (2.6)$$

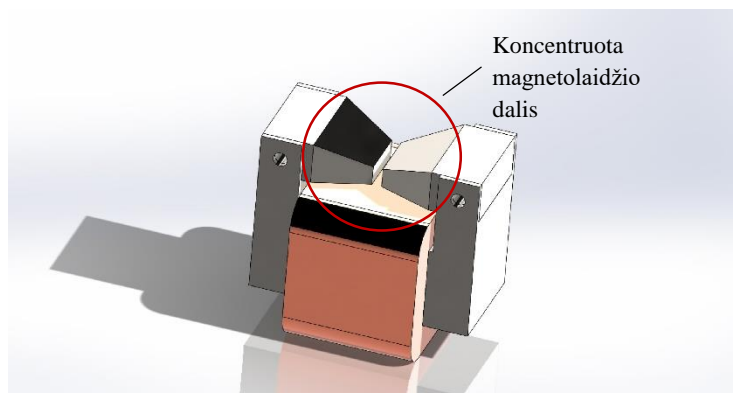
Kombinuojant šias dvi priklausomybes: $\Psi = N\Phi = LI$ ir $\Phi = \frac{NI}{R}$ gaunama [67]:

$$L = \frac{N^2}{R} . \quad (2.7)$$

Parenkant magnetolaidį svarbus veiksnys – maža magnetolaidžio magnetinė varža (pasirinkta medžiaga – plienas AISI 1018). Tai buvo būtina norint sukurti koncentruotą stiprų magnetinį lauką oro tarpelyje ir tarpelyje su magnetoreologiniu

skysčiu. Tai yra būtinas reikalavimas pasiekti maksimaliam magnetoreologiniam efektui.

Viena iš priemonių padidinti magnetinio lauko indukciją B (T) tarpelyje – speciali polių geometrija.



2.5 pav. Magnetolaidžio vaizdas

Paveiksle 2.3 vaizduojamas visas elektromagneto vaizdas išskiriant specialios formos magnetinius polius. Magnetolaidžio geometrija ties oro tarpeliu buvo mažinama. Mažinamas plotas S tam, kad būtų sukoncentruotos magnetinio lauko linijos ir padidintas magnetinės indukcijos B dydis, tai matyti iš išraiškos [68]:

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad , \quad (2.8)$$

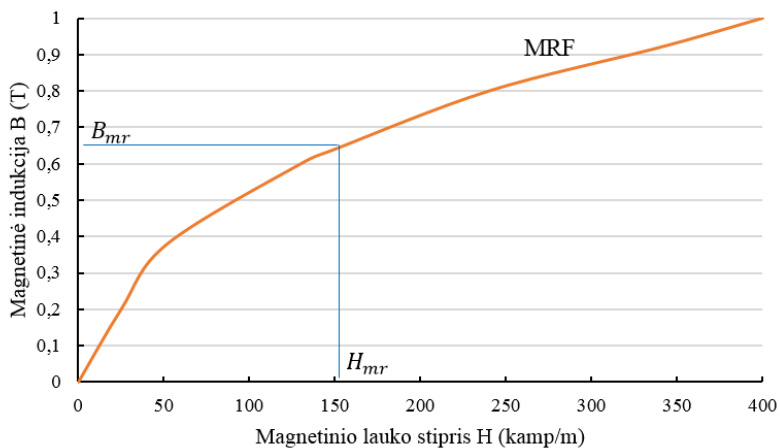
kur B – magnetinio lauko indukcija (T). Tai yra svarbiausias dydis apibūdinantis magnetinio lauko dydį kiekviename jo taške, Φ – magnetinis srautas (Wb) – magnetinės indukcijos vektorius veriantis paviršių, kurio plotas S . Iš formulės matyti, kad kuo plotas S yra mažesnis, tuo magnetinio lauko indukcija B yra didesnė.

Veiksniai, į kuriuos reikia atsižvelgti, tai – netiesinės magnetoreologinio skysčio magnetinės savybės. Galimi magnetiniai nuostoliai sujungimuose ir kontūro kraštuose, kuomet ribinės įtampos ir srovės reikšmės ($I=0 - 3$ A). Galima sūkurinių srovių įtaka.

Parenkant medžiagą iš kurios pagamintas magnetolaidis buvo atsižvelgta į tai, jog mažaanglis plienas turi didelę magnetinę skvarbą ir reikiamą įsisotinimą. Geriausias magnetines savybes plienas turi tuomet, kai jo sudėtyje yra ne daugiau kaip 0,15 % anglies. Tiriamuoju atveju pasirinktas AISI – 1018.

Pjezoelektrinio klampumo matavimo metodo, skirto magnetoreologiniams skysčiams tirti, magnetinio kontūro projektavimo etapai:

1-as etapas. Darbinio taško radimas $B - H$ kreivėje (2.4 pav.) (taškai H_{mr} ir B_{mr}). Magnetoreologiniam skysčiui, prie norimos ribinių šlyties įtempimų τ_y ribos:



2.6 pav. Magnetoreologinio skysčio MRF – 122ED B – H kreivė [13]

Suminis magnetinis laukas apskaičiuojamas [69]:

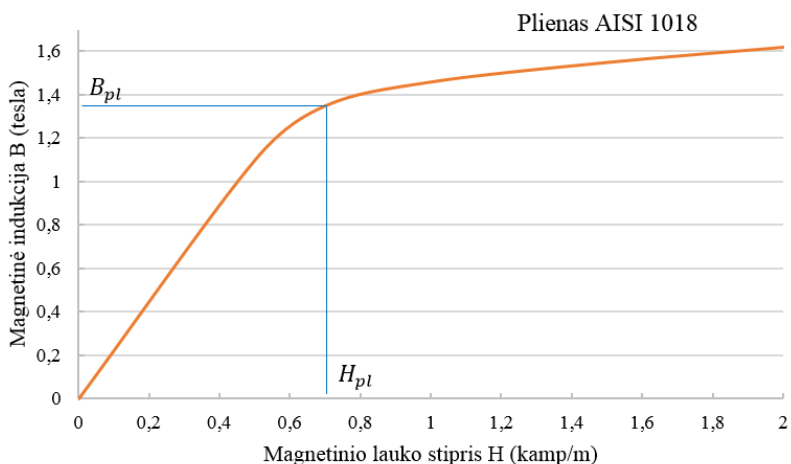
$$\Phi = B_{mr} S_{ef}. \quad (2.9)$$

Magnetinio srauto tęstinumas aprašomas $\Phi_{tarpelio} = \Phi_{plieno}$ [70]:

$$B' = \frac{\Phi}{S'} = \frac{B_{mr} S_{ef}}{S'}. \quad (2.10)$$

kur B' – magnetinio lauko indukcija visame magnetolaidyje; Φ – magnetinis srautas; B_{mr} – magnetinio lauko indukcija magnetoreologiniame skystyje; S_{ef} – tai magnetiškai efektyvus poliaus plotas; S' magnetolaidžio skerspjūvio plotas.

2-as etapas. Darbinio taško radimas B – H kreivėje (2.5 pav.) (taškai H_{pl} ir B_{pl}) magnetolaidžiui, kurio medžiaga yra plienas.



2.7 pav. Plieno AISI 1018 įmagnetinimo B – H kreivė [70]

$$B_{pl} = \frac{\Phi_{pl}}{S'} = \frac{B_{mr} S_{ef}}{S'}. \quad (2.11)$$

H_{pl} nustatytas iš plieno B – H kreivės.

1. Kirchofo dėsnis magnetinei grandinei:

$$NI = hH_{mr} + LH_{pl}. \quad (2.12)$$

Atliekant magnetinio kontūro projektavimą reikia atlikti magnetinės indukcijos B(T) skaičiavimus oro tarpelyje tarp dviejų magnetinių polių. Reikšminis magnetinių polių plotas S, kurį veria magnetinės linijos. Magnetinė indukcija apskaičiuojama:

$$B = \frac{\mu_{oro} \mu_0 NI}{l}, \quad (2.13)$$

kur μ_{oro} – santykinė aplinkos magnetinė skvarba (oro); μ_0 – magnetinė konstanta; N – vijų skaičius; I – elektros srovės tekančios apvijomis stipris; l – solenoido (ritės) ilgis.

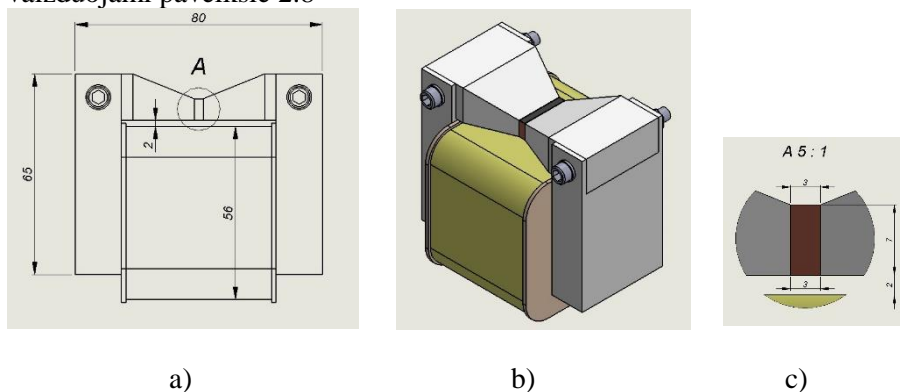
$$B = 12.56 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{750 \cdot 3}{3 \cdot 10^{-3}} = 0.942 T.$$

Atlikus skaičiavimus gauta magnetinės indukcijos reikšmė B=0.942 T artima reikiamai B=1T reikšmei. Esant tokiai magnetinės indukcijos reikšmei visiškai susiformuoja magnetoreologinis efektas, kai vidinės skysčio magnetinės dalelės

susikabina į taisyklingas grandinėles ir gaunamas maksimalus įmanomas skysčio klampumas.

2.1.2 Magnetinių laukų skaitinis modeliavimas

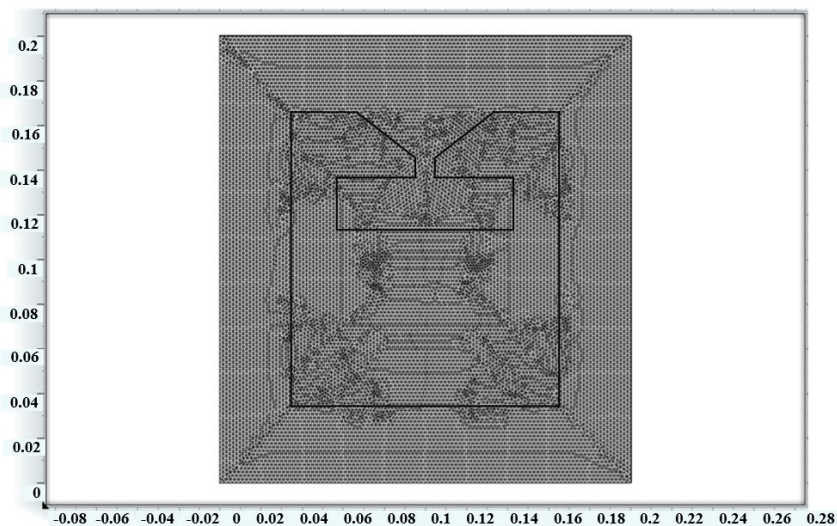
Magnetinių laukų skaitinis modeliavimas pradedamas pateikiant tiriamojo objekto – elektromagneto – detalų vaizdą ir geometrinius parametrus, kurie vaizduojami paveiksle 2.8



2.8 pav. Elektromagneto: a) geometrinis modelis; b) 3D modelis; c) detalusis oro tarpelio vaizdas

Modeliavimas atliktas su *Comsol Multiphysics* versija 4.4. Magnetinė grandinė yra uždara ir jos skerspjūvio plotas S yra nekintantis dydis, magnetinis srautas Φ yra koncentruotas magnetiniame poliuje. Magnetinio srauto reikšmė tiek tarpelyje su magnetoreologiniu skysčiu, tiek oro tarpelyje yra lygi $\Phi_{mr} = \Phi_{oro}$.

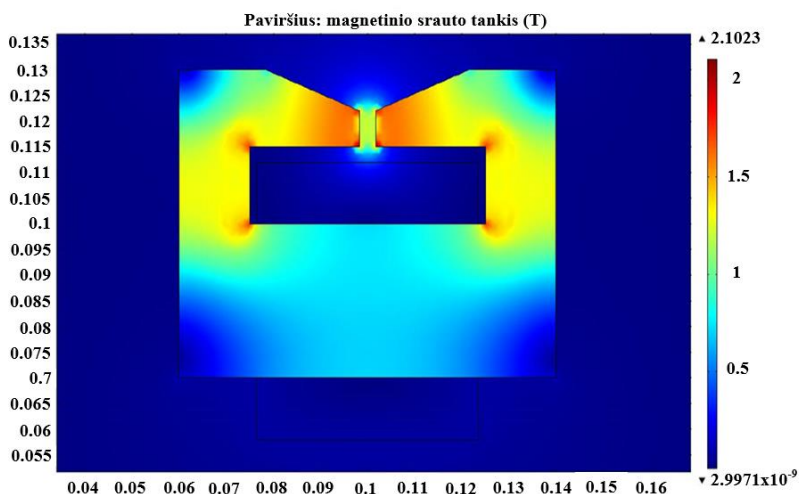
Magnetinių laukų pasiskirstymas magnetolaidyje išspręstas modeliuojant su anksčiau paminėta programa.



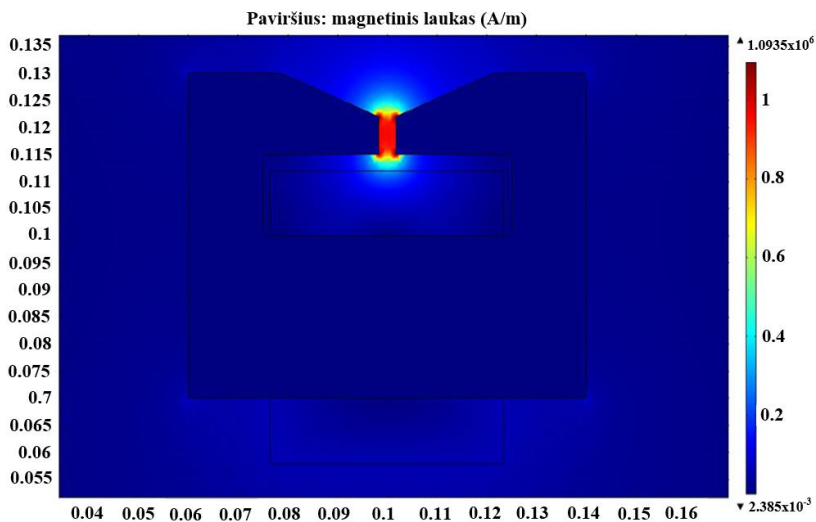
2.9 pav. Elektromagneto baigtinių elementų tinklelis

Tai geometrinis tiriamojo objekto modelis, kuris yra pateiktas 2.9 paveiksle, (įskaitant objekto geometrinį aprašą, dalių žymes ir baigtinių elementų tinklelį). Pastarasis sukurtas modeliavimo tikslumui vizualizuoti. Kaip jau buvo minėta, svarbiausias magnetinis dydis yra magnetinio lauko indukcija B (T).

Skaičiavimas su 3 A srove tekančia rite.

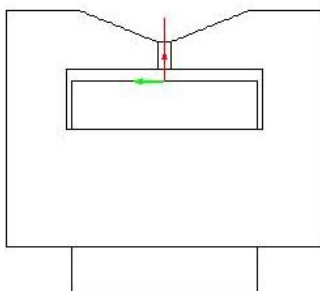


2.10 pav. Magnetinio srauto tankio pasiskirstymas erdvėje, kai elektromagneto apvijomis teka $I=3A$ srovė

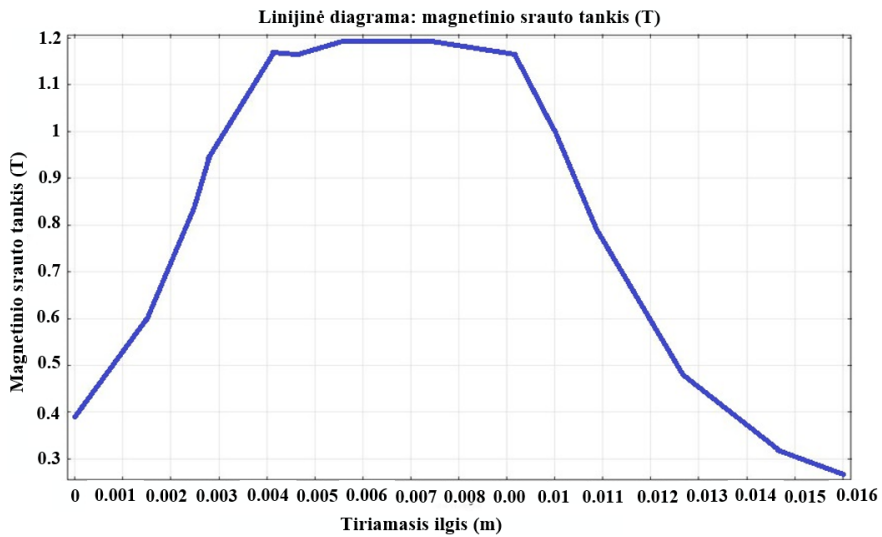


2.11 pav. Magnetinio lauko stiprio pasiskirstymas erdvėje, kai elektromagneto apvijomis teka $I = 3\text{ A}$ srovė

Magnetinio srauto tankio pasiskirstymas elektromagnete yra vaizduojamas 2.10 ir 2.11 paveikslė. Elektros srovė tekanti elektromagneto apvijomis yra 3 A. Tai yra didžiausia tiriamuoju atveju reikšmė, kuriai esant yra pasiekiamas $\sim 1\text{ T}$ magnetinės indukcijos B dydis. Kitame paveiksle 2.12 yra pateikiama tiriamojo lauko linija.

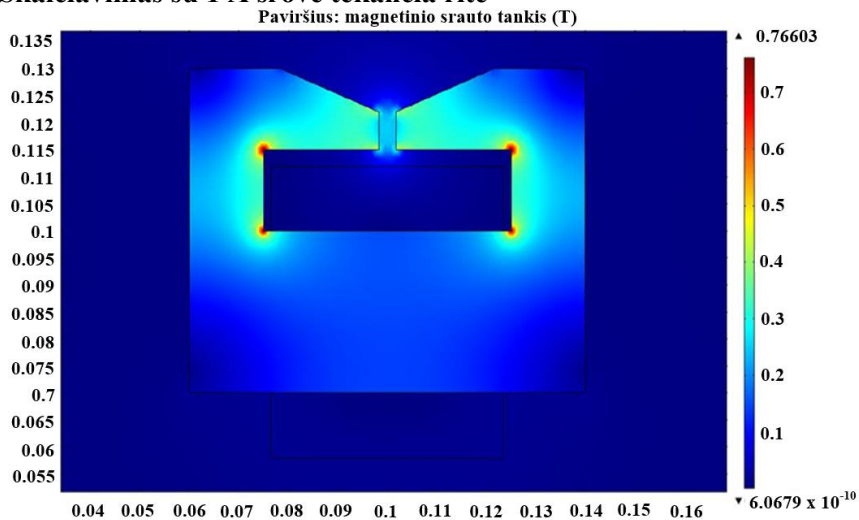


2.12 pav. Lauko linija, kurioje pavaizduotas magnetinio srauto tankio vertės



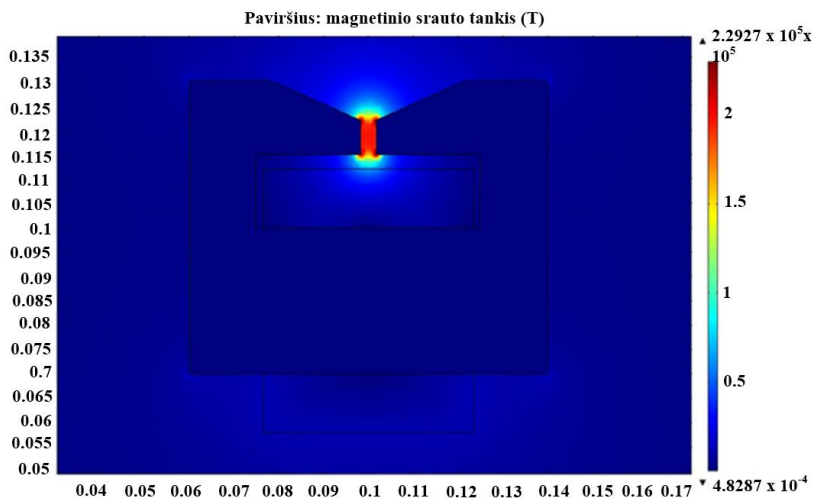
2.13 pav. Srauto tankio vertės linijoje. Elektromagneto apvijomis teka elektros srovė $I=3A$

Skaičiavimas su 1 A srove tekančia rite

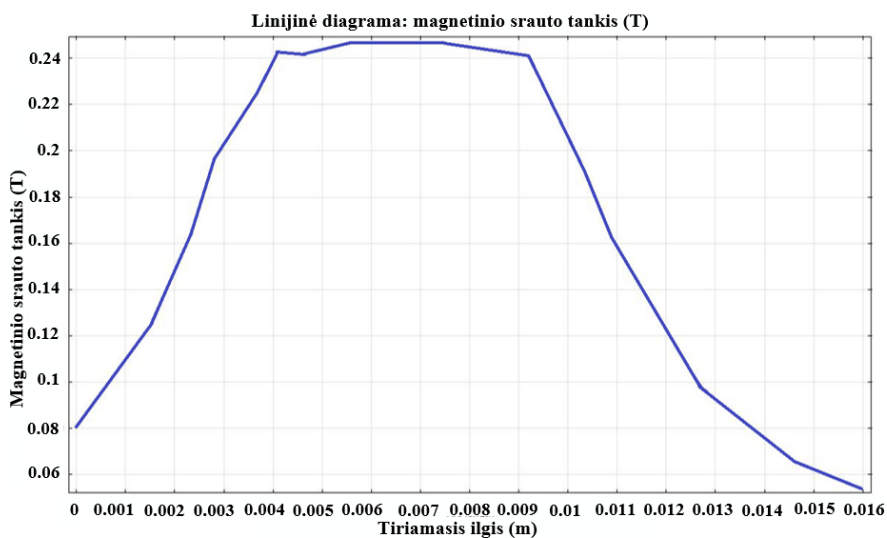


2.14 pav. Magnetinio srauto tankio pasiskirstymas erdvėje, kai elektromagneto apvijomis teka $I= 1A$ srovė

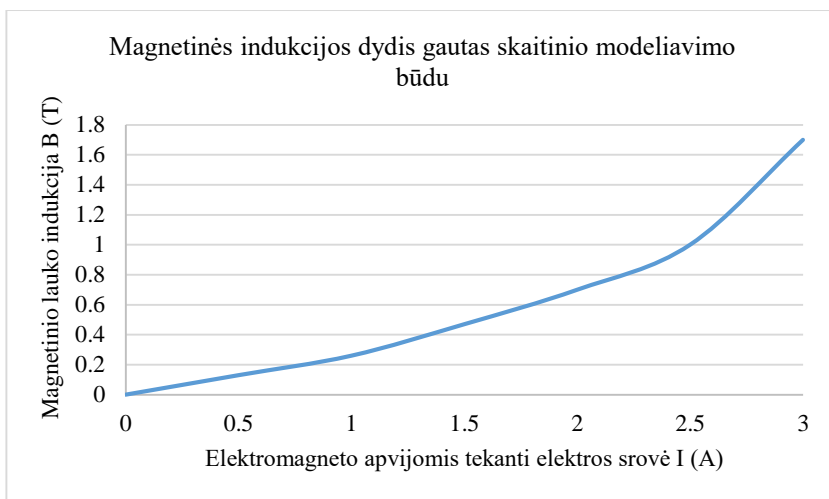
Paveiksluose 2.13 ir 2.16 matomas magnetinio srauto tankio dydžio pasiskirstymas tiriamajame tarpelio ilgyje esant skirtingoms elektros srovės reikšmėms (kai $I=3A$ ir $I=1A$). Pateiktuose 2.14 ir 2.15 paveiksluose vaizduojamas magnetinio srauto pasiskirstymas erdvėje, kai elektromagneto apvijomis teka $I=1A$.



2.15 pav. Magnetinio lauko stiprio pasiskirstymas erdvėje, kai elektromagneto apvijomis teka $I=1\text{A}$ srovė



2.16 pav. Srauto tankio vertės linijoje. Elektromagneto apvijomis teka elektros srovė $I=1\text{A}$



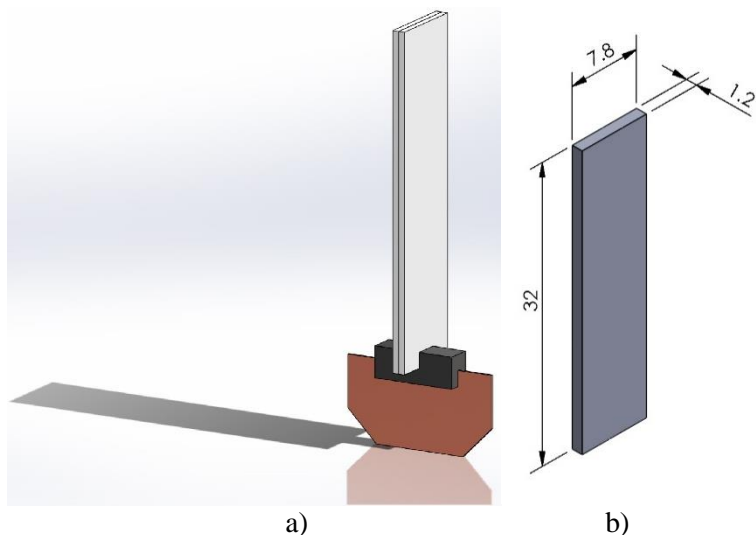
2.17 pav. Magnetinio lauko indukcijos priklausomybė nuo elektros srovės, tekančios elektromagneto apvijomis

Atlikus skaitinį magnetinių laukų pasiskirstymo elektromagnete modeliavimą gautas maksimaliai artimas eksperimentiniams skaičiavimams magnetinės indukcijos tikėtinas rezultatas. Sukuriamas, magnetinės indukcijos dydis B (T), 3,5 mm oro tarpelyje, kai elektromagneto apvijomis teka $I=3A$, gaunamas 1.17T. Atliekant skaitinį modeliavimą *Comsol Multiphysics 4.4* programa buvo gauti rezultatai, kurie yra pateikiami 2.17 paveiksle. Kituose disertacijos skyriuose bus tiriamas pjezoelektrinis keitiklis. Skaitinio modeliavimo rezultatai patvirtino, jog siekiamas magnetinės indukcijos B dydis prie, kurios pilnai susiformuoja magnetoreologinis reiškinys, yra gautas tikėtinas $\sim 1T$. Todėl yra tęsiamas sistemos tyrimas.

2.2 Pjezoelektrinio keitiklio skaitinis modeliavimas

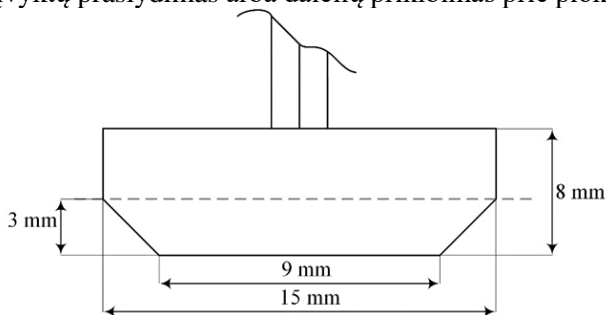
Siekiant sukurti pjezoelektrinio keitiklio dinaminį poslinkį klampioje terpėje, t. y. magnetoreologiniame skystyje išmatuoti klampumą, buvo pasirinktas gembinio tipo pjezoelektrinis keitiklis. Šiame keitiklyje pasireiškia tiek tiesioginis, tiek atvirkštinis pjezoelektas. Pjezoelektrinis keitiklis yra sudarytas iš trijų sluoksnių: dviejų pjezoelektrinių sluoksnių ir vieno epoksidinių klijų sluoksnio, kuris juos sujungia. Kada keitiklis yra aktyvioje būsenoje, vienas jo sluoksnis yra tempiamas, o kitas gniuždomas. Pjezoelektrinio keitiklio modeliavimas atliktas su *Comsol Multiphysics 4.4*. Pjezoelektrinis keitiklis, kuris buvo modeliuojamas, yra pagamintas iš dviejų keramikos sluoksnių, kurių vieno sluoksnio storis yra 60 μm , o pasiekiami amplitudiniai atsilenkimai yra esant labai nedidelėms jėginėms įtampoms. Maksimalūs atsilenkimai yra $\pm 345 \mu m$. Blokuojanti jėga yra 2,25N.

Pjezoelektrinis keitiklis yra sudarytas iš trijų sluoksnių (2.20 pav.). Du iš jų: viršutinis ir apatinis pjezoelementai padengti elektrodais, trečiasis vidurinis – epoksidiniais klijais.

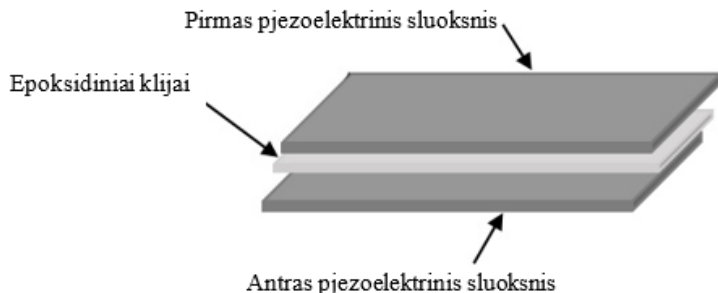


2.18 pav. Pjezoelektrinio bimorfinio keitiklio bendras vaizdas: a) pjezoelektrinis keitiklis Noliac CMBP05, kurio gale pritvirtintas kontaktuojantis elementas; b) pjezoelektrinio keitiklio geometriniai parametrai

Tiesioginiam kontaktui su tiriamuoju magnetoreologiniu skysčiu parinktas specialios formos kontaktuojantis elementas. Toliau 2.19 paveiksle pateikiamas dviejų dimensijų kontaktuojančio elemento vaizdas ir jo geometriniai parametrai. Kontaktuojantis elementas pagamintas iš vario, kurio vidutinė aritmetinė profilio nuokrypa $Ra=0,8 \mu\text{m}$ (kitaip šiurkštumas). Varinės plokštelės paviršiaus šiurkštumas pasirinktas atsižvelgus į magnetoreologinio skysčio ir varinės plokštelės tiesioginės šlyties efektą, kai yra reikia atitinkamo šiurkštumo, kad kontakto su tiriamuoju skysčiu metu neįvyktų praslydimas arba dalelių prikibimas prie plokštelės paviršiaus.



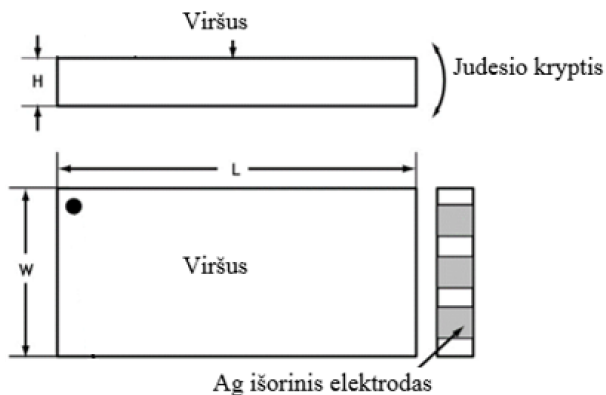
2.19 pav. Kontaktuojančio elemento, veikiančio tiesioginės šlyties režimu matmenys



2.20 pav. Pjezoelektrinio suklijuoto elemento su vienu aktyviu ir vienu neaktyviu sluoksniu schema

Skaitinio modeliavimo tyrimo metu naudojamas gėmiškai įtvirtintas pjezoelektrinis keitiklis. Vienas jo sluoksnis yra aktyvus, į kurį yra paduodama įtampa, o kitas jo sluoksnis yra neaktyvus. Dirbant šiuo režimu pasireiškiantis pjezoelektrinis efektas yra ir tiesioginis, ir atvirkštinis. Aktyvusis sluoksnis veikia atvirkštiniu pjezoefektu, kada veikiant elektriniam signalui generuojami mechaniniai virpesiai. Pasyvusis pjezoelementas veikia tiesioginiu pjezoefektu, veikiant deformacijoms kūnas įsielektrina.

Atliekant skaitinį sistemos modeliavimą sprendimo sąlygos buvo redukuojamos. Neniutoninių skysčių fizika labai sudėtinga, jų modeliavimas skaitiniu būdu taip pat aprašomas sudėtinėmis lygtimis. Redukuotas modelis visiškai tenkino realias sąlygas.



2.21 pav. Pjezoelektrinis elementas *Noliac* CMBP05 [71]

2.2 lentelė. Pjezoelektrinio elemento *Noliac* CMBP05 techninės charakteristikos [72]

Savybė	Reikšmė	Tolerancija
Ilgis (L)	32 mm	±0,65 mm
Plotis (w)	7,8 mm	±0,15 mm
Aukštis (H)	1,2 mm	±0,10 mm
Maksimali darbinė įtampa	200 V	
Maksimalus atsilenkimas	±345 μm	±15 %
Blokavimo jėga	2,25 N	±20 %
Talpa	2x320 nF	±15 %
Standumas	0,00065 N/m	±20 %
Maksimali darbinė temperatūra	150 °C	
Medžiaga	NCE57	
Rezonansinis dažnis	>490 Hz	

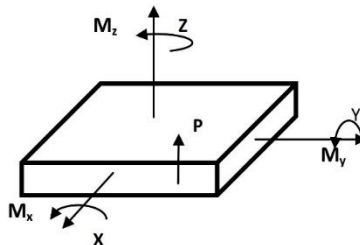
Analitiniam, skaitiniam bei eksperimentiniam tyrimui lenkimo tipo *Noliac* pjezoelektrinis vykdiklis yra parenkamas dėl santykinai didelių pasiekiamų atsilenkimų esant žemiems jėginiams parametrams. Techninės charakteristikos yra pateikiamos 2.21 paveiksle ir 2.2 lentelėje. Šis vykdiklis yra gaminamas iš dviejų keramikos sluoksnių. Šie sluoksniai tarpusavyje yra sujungiami epoksidiniais klijais. Įvertinus visas technines galimybes toliau atliekamas skaitinis pjezoelektrinio keitiklio modeliavimas.

2.2.1 Baigtinių elementų metodo taikymas pjezokeitiklio modeliavimui

Dauguma pjezokeitiklių yra gaminami iš pjezoelektriškai aktyvių medžiagų, dažniausiai iš pramoninės pjezokeramikos. Šiuo metu yra žinoma šimtai medžiagų, pasižyminčių pjezoelektrinėmis savybėmis, bet tik nedaugelis jų atitinka reikalavimus, keliamus pjezokeitikliams. Pirmoji, jau klasikine tapusi pjezokeraminė polikristalinė medžiaga yra bario titanatas BaTiO₃. Atradus šios polikristalinės medžiagos segnetoelektrines savybes, buvo realizuota galimybė pramoniniu būdu gaminti pjezokeitiklius. Panaudojus modifikuojančius komponentus – kalcij ir kobaltą, pjezokeramikai suteikiama specifinių savybių: didesnis atsparumas mechaniniams įtempimams, platesnis darbinės temperatūros intervalas. Parenkant pjezokeramikos sudėties komponentes atsižvelgiama į pjezokeitiklio panaudojimo sritį.

Pjezokeraminės medžiagos – tai netiesiniai kietieji tirpalai, sudaryti iš segnetoelektrinių kristalinių junginių. Jos turi griežtą domenų orientaciją, t. y. liekamąją poliarizaciją. Pjezokeramika struktūriškai apibrėžiama kaip nevienalytė polikristalinė sistema. Ją sudarantys kristalai (grūdai) priklauso nuo medžiagos formavimo sąlygų ir dažniausiai turi skirtingus matmenis, formą, o kartais net ir defektus kristalinėse gardelėse. Nors pjezokeramika nepriklauso klasikinės keramikos tipui, tačiau jos gamybos technologija – sudėtinių medžiagų kepinimas aukštoje temperatūroje – leidžia priskirti šį kietąjį tirpalą keramikos grupei. Kepinimo metu gauta medžiagos dielektrinė struktūra – segnetoelektrinė keramika nepasižymi

pjezoelektrinėmis savybėmis tol, kol ji nėra nepoliarizuojama. Pjezokeramika, kaip bet kuri kita dielektrinė medžiaga, turi dipolių sancaupos vietas – domenų [73,74]. Nors kiekvienas domenas ir pasižymi kryptinga poliarizacija, bet dėl chaotiškos jų visumos, orientacijos suminė keraminės struktūros poliarizacija yra lygi nuliui. Tai yra energetiškai naudinga polikristalinė būseną. Kampas tarp dviejų gretimų domenų poliarizacijos ašių nėra atsitiktinis. Tai gali būti apibrėžtas diskretinis dydis, priklausantis nuo medžiagos kristalinės struktūros. Esant keraminei medžiagai elektriniame lauke, vyksta domenų poliarizacijos perorientacija. Dėl to pjezokeraminiame elemente atsiranda suminė poliarizacija, kuri neišnyksta, nors elektrinis laukas ir nebeveikia. Nepoliarizuota keramika yra izotropinė medžiaga, todėl poliarizuojančio elektrinio lauko kryptis gali būti neapibrėžta. Tačiau pjezokeramika jau turi griežtai apibrėžtą struktūrą bei nustatytas koordinatinių ašių kryptis, todėl poliarizacijos vektoriaus kryptis yra viena iš svarbesnių daugiamačių pjezoelektrinių charakteristikų. Pjezokeraminio elemento ašių orientacija yra nustatoma taip, kad Z ašies (pjezoašies) kryptis sutaptų su viena iš polinių ašių kryptimi, o kitos ašys X (optinė) ir Y (mechaninė) parenkamos pagal dešininę koordinatinių sistemą (2.21 pav.). Praktiškai nustatinėjant pjezoelemento ašis, pjezoašies kryptis sutapatinama su poliarizacijos vektoriaus kryptimi [75]. Poliarizacijos metu vyksta ne tik pjezokeramikos struktūros perorientacija, bet keičiasi ir jos mechaninės savybės. Heksogonalinės struktūros pjezokeraminė medžiaga paprastai laikoma izotropine plokštumoje xOy ir anizotropine plokštumose xOz ir yOz (2.21 pav.).



2.22 pav. Pjezokeraminio elemento ašių orientacija [75]

Poliarizuojant keraminius elementus pastoviam elektriniame lauke yra pastebimas jų dielektrinių savybių netiesiškumas. Šį reiškinį atspindi dielektrinės histerezės kilpa [75]. Remiantis tokia priklausomybe, poliarizacijos proceso pradžioje, taip pat esant stipriam elektriniam laukui, poliarizacijos išraiška yra netiesinė. Tik tam tikrame elektrinio lauko reikšmių intervale poliarizacija tampa tiesiškai priklausoma nuo elektrinio lauko. Šiame intervale poliarizacijos reikšmė yra lygi spontaninės ir indukuotos poliarizacijų sumai. Pjezoelektrinės medžiagos savybės priklauso nuo poliarizuojančio lauko stiprumo, temperatūros, poliarizacijos trukmės ir krypties.

Poliarizacijos vektoriaus išraiška aprašoma tokia lygtimi [76] :

$$\{P\} = [d]\{\sigma\}, \quad (2.14)$$

kur $\{P\}$, $\{\sigma\}$ – poliarizacijos ir mechaninių įtempimų vektoriai; $[d]$ – medžiagos pjezoelektrinių modulių matrica.

Atsižvelgiant į pjezokeraminės medžiagos anizotropines savybes, pjezoelektrinių modulių matrica bendru atveju turi tokią išraišką [77]:

$$[d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

Pjezokeraminės medžiagos yra polikristalai, turintys jonizuotą, asimetrinę kristalinę gardelę. Kadangi pjezokeramikos kristalinė gardelė neturi simetrijos centro, tai pjezokeramika pasižymi liekamąja poliarizacija, pjezoeffektu ir kitomis savybėmis. Jei kristalinė gardelė veikiama išorinės jėgos deformuojasi skirtingomis kryptimis, tai polikristalo priešinguose paviršiuose kaupiasi skirtingų ženklų krūviai (tiesioginis pjezoeftas). Kai mechaninių deformacijų vektorius kryptis sutampa su pjezokeraminės medžiagos pjezoašimi, gaunamas maksimalus tiesioginis pjezoeftas. Šis reiškinys taip pat pastebimas deformuojant pjezokeraminį elementą mechaninės ašies kryptimi. Esant bet kokiam mechaniniam poveikiui optinės ašies kryptimi pjezoeftas nepasireiškia. Fizikinis atvirkštinio pjezoefto mechanizmas yra aiškinamas naudojant analogišką modelį kaip ir tiesioginis. Kai pjezoelektrinio elemento poliarizacijos ašiai statmeni paviršiai yra apkrauti priešingų ženklų elektros krūviais, elektrostatių jėgų veikiama deformuojasi kristalinė gardelė. Fizikine prasme, atvirkštinis pjezoeftas panašus į kiekvienam dielektrikui būdingą elektrostrikcijos reiškinį, tačiau yra ir esminių skirtumų.

Pjezokeraminės struktūros elementaraus tūrio tiesinės pjezoelektrinio efekto lygtys gali būti užrašytos taip [78]:

$$\begin{cases} \{\sigma\} = [c^E] \{\varepsilon\} - [e]^T \{E\} \\ \{D\} = [e] \{\varepsilon\} + [\varepsilon^E] \{E\} \end{cases}, \quad (2.16)$$

kur $\{D\}$, $\{E\}$, $\{\varepsilon\}$, $\{\sigma\}$ – elektrinės indukcijos, elektrinio lauko stiprumo, mechaninių deformacijų ir mechaninių įtempimų vektoriai; $[c^E]$, $[\varepsilon^E]$, $[e]$ – tamprumo matrica, kai yra pastovus elektrinio lauko stiprumas, dielektrinių konstantų matrica, kai yra pastovios mechaninės deformacijos, pjezoelektrinių konstantų matrica.

Lygčių sistema (2.20) yra viena iš keturių galimų pjezoefto išraiškos formų. Užrašant mechaninių įtempimų vektorius išraišką lygtyje (2.20), yra naudojama pjezoelektrinių konstantų matrica, kuri turi tokią išraišką [78,79]:

$$[e] = [d][c^E]. \quad (2.17)$$

Esant pastoviam elektrinio lauko stiprumui ir poliarizacijos vektorius kryptčiai pjezoefto tamprumo matrica užrašoma taip [80]:

$$[c^E] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12}) \end{bmatrix}. \quad (2.18)$$

Pjezokeitlikio elektrinių charakteristikų apibrėžimui yra naudojami tokie dydžiai: elektrinio lauko stiprumas, elektrinė indukcija, dielektrinės konstantos. Šie dydžiai tarpusavyje susieti tokia lygtimi [80]:

$$\{D\} = [\varepsilon] \{E\}. \quad (2.19)$$

Jutikliams naudojamų pjezokeraminių medžiagų svarbiausia savybė yra pjezojautrumas. Šią charakteristiką apibūdina pjezoelektrinis įtempimų koeficientas [80]:

$$[g] = [\varepsilon^\sigma]^{-1} [d], \quad (2.20)$$

kur $[g]$ – pjezoelektrinė įtempimų koeficientų matrica, o $[\varepsilon^\sigma]$ – dielektrinių konstantų matrica, kai yra vienodi mechaniniai įtempimai. Ji parodo elektrinio signalo, ateinančio nuo keitlikio elektrodų, stiprumą, tuo pačiu metu naudojant jį padėties, greičio ir jėgos dydžio matavimams.

Pjezoelektrinis deformacijos koeficientas – tai dar vienas dydis, apibūdinantis pjezokeramikos savybes. Jis apibrėžia mechaninius įtempimus, atsiradusius pasikeitus elektrinio krūvio tankiui [80]:

$$[h] = [g] [c^D], \quad (2.21)$$

kur $[h]$ – pjezoelektrinė deformacijų koeficientų matrica, o $[c^D]$ – tamprumo matrica, kai yra pastovus elektrinės indukcijos vektorius.

Veikiant pjezoelektrinį elementą išorinėmis mechaninėmis apkrovomis, dalis mechaninės energijos pereina į akumuliuojamą elemente elektrinę energiją. Šį procesą apibūdina elektromechaninis koeficientas [81]:

$$k_E = \sqrt{\frac{h^2 \varepsilon^\varepsilon}{c^D}}, \quad (2.22)$$

kur k_E – elektromechaninis koeficientas. Šis koeficientas parodo pjezokeitliklio darbo efektyvumą, todėl natūralu, kad projektuojant pjezokeitliklius parenkamos pjezokeraminės medžiagos, turinčios dideles elektromechaninio koeficiento reikšmes.

Analizuojant pjezokeitliklių pagrindines charakteristikas, kurios susietos su pjezokeraminės medžiagos savybėmis, buvo manoma, kad pjezoelekto reiškiny aprašomas kaip tiesinė sistema. Todėl pagrindinė lygčių sistema, aprašanti pjezoelektrinius procesus, galioja tik esant mažiems fizikinių dydžių pokyčiams, nors atskirais atvejais gali būti taikoma ir apibūdinant kvazitiesinę sistemą su kintamais koeficientais. Norint aprašyti realiai egzistuojančias netiesines pjezoelektrinio efekto savybes reikia papildomai išanalizuoti reiškinių.

Baigtinių elementų metodas yra vienas populiariausių ir efektyviausių inžinerinių metodų sudėtingoms kompleksinėms struktūroms modeliuoti bei tirti. Jis pradėtas taikyti penktojo dešimtmečio pradžioje statybos mechanikos specialistų, gal todėl ir šiandien naudojama terminologija siejama su kūno mechanikos pavadinimais. Mažų poslinkių teorema tapo baigtinių elementų metodo plėtros pagrindu, nes konstrukcijų analizė poslinkių metodu buvo ir tebėra populiari. Kai konstrukcija turi sudėtingą geometrinę formą bei kraštines sąlygas, analitinis bei eksperimentinis tyrimai tampa techniškai sudėtingi. Taikant baigtinių elementų metodą, kai tiriamasis modelis aproksimuojamas baigtinio dydžio elementais, yra atliekamas efektyvus skaitinis tyrimas.

Baigtinių elementų metodo lygtys pjezoelektriniam kūnui, užimančiam tūrį V ir apribotam paviršiumi S , gali būti formuluojamos remiantis variaciniu ekstreminiu arba virtualių darbų principais. Naudojant variacinį ekstreminį principą minimizuojama pjezoelektrinio kūno pilna potencinė (įskaitant ir elektrostatinę) energija, kuri turi šią išraišką [81]:

$$\chi = \frac{1}{2} \int_V \left(\{\varepsilon\}^T \{\sigma\} - \{E\}^T \{D\} \right) dV - \left[\{u\}^T \{P_c\} + \int_V \{u\}^T \{P_b\} dV + \int_{S_1} \{u\}^T \{P_s\} dS_1 - \int_{S_2} \{\phi\}^T \{Q\} dS_2 \right], \quad (2.23)$$

kur χ – pjezoelektrinio kūno pilna potencinė energija, $\{u\}$ – poslinkių vektorius, $\{\phi\}$ – elektrinių potencialų vektorius, $\{E\}$ – elektrinio lauko vektorius, $\{\sigma\}$ – mechaninių įtempimų vektorius, $\{P_c\}$ – koncentruotų išorinių apkrovų vektorius, $\{P_b\}$ – išorinių tūrinių apkrovų vektorius, $\{P_s\}$ – išorinių paviršinių apkrovų vektorius, $\{Q\}$ – elektrinių krūvių vektorius, S_1 – paviršiaus plotas, kuris yra veikiamas $\{P_s\}$ apkrovos, S_2 – paviršiaus plotas, kuris yra veikiamas elektros krūvio $\{Q\}$.

Bendru atveju mechaniniai paviršiaus įtempimai bei poslinkiai, elektriniai krūviai ir potencialai gali būti apibrėžiami kaip kraštinės sąlygos tam tikrose pjezoelektrinio kūno vietose ir paviršiaus srityse. Bet dažnai pakanka nagrinėti kraštines sąlygas, nusakomas tam tikrais poslinkiais ir potencialais, o mechanines

apkrovas ir elektrinius krūvius laikyti koncentruotomis mazginėmis apkrovomis. Tokios kraštinės sąlygos yra taikomos apskaičiuojant virpesius, sužadintus paveikus pjezokeitlikio elektrodus kintamu elektriniu signalu.

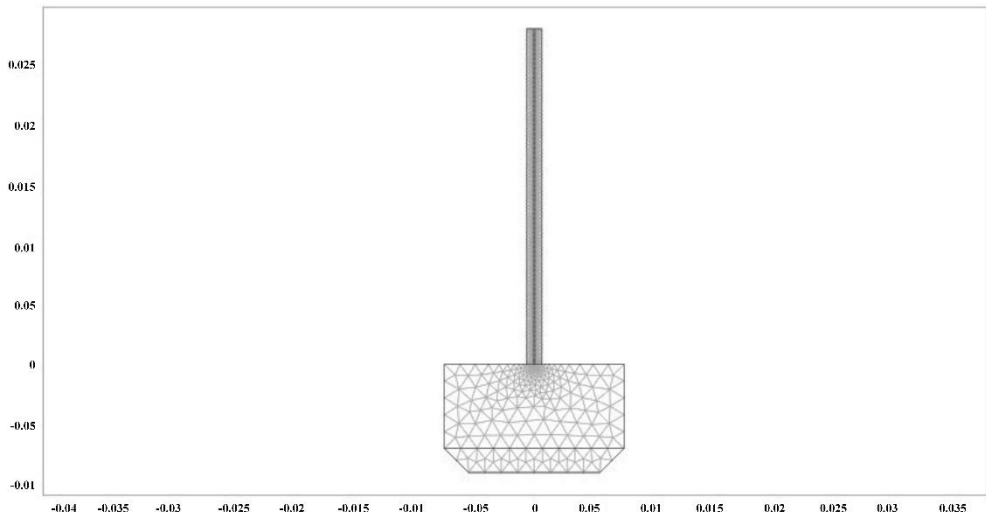
Įprastinio pavidalo konstrukcijos dinamikos lygtį su pateiktu mazginių jėgų vektoriumi dešinėje pusėje [81]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[T_1]\{\phi_1\} - [T_2]\{\phi_2\}. \quad (2.24)$$

Tokio pavidalo pjezokeitlikio dinamikos lygtis yra paprastai taikoma skaičiuojant daugiamačius pjezokeitikius.

2.2.2 Pjezoelektrinio keitiklio skaitinio modeliavimo rezultatai

Atlikus skaičiavimus *Comsol Multiphysics 4.4* modeliavimo paketu gautas pjezoelektrinio keitiklio baigtinių elementų tinklelis:

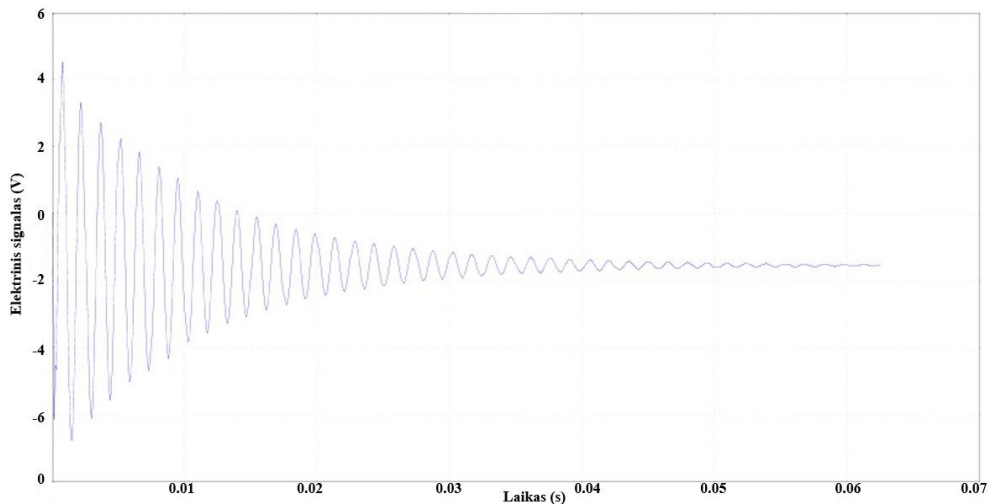


2.23 pav. Pjezoelektrinio keitiklio su KE baigtinių elementų tinklelis

2.23 paveiksle pateikiamas geometrinis tiriamojo objekto modelis įskaitant objekto geometrinį aprašą, dalių žymes ir baigtinių elementų tinklelį. Pastarasis sukurtas modeliavimo tikslumui vizualizuoti.

Magnetoreologinis skystis priklauso neniutoninių skysčių grupei. Jo klampumas yra gerokai didesnis lyginant su niutoniniais skysčiais (pvz. vandeniu). Sprendžiant pjezoelektrinio keitiklio dinamikos ir statikos uždavinius įvertinama sudėtinga magnetoreologinio skysčio reologija. Magnetoreologinio skysčio takumas ir jo grįžimas į pradinę būseną (konkrečiu atveju grįžtamasis MRS aptekėjimas aplink KE) taip pat sąlygoja tyrimo rezultatus. Skysčio klampumas yra kintantis dydis, priklausomas nuo magnetinio lauko stiprumo. Atliekant pradinis eksperimentinius

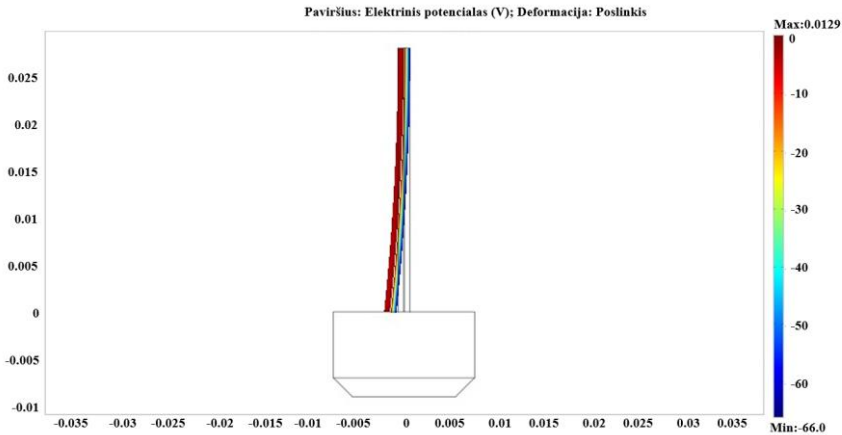
tyrimus nustatyta, jog jei pjezoelektrinis keitiklis veikia rezonansiniu dažniu ($f=490$ Hz), gauti rezultatai pasiekus tam tikrą klampumo ribą yra netikslūs. Kontaktuojančio elemento ir magnetoreologinio skysčio sąlyčio metu magnetoreologinis skystis dėl savo klampumo negeba per trumpą laiką grįžti į pradinę takumo būseną. Nutrūksta sąlytis ir kontaktuojantis elementas veikia ne tiesioginės šlyties su MRS būdu, bet iš dalies ir ore. Dėl šios priežasties buvo pasirinktas žemas pjezoelektrinio keitiklio dažnis $f=10$ Hz ir sprendžiamas *kvazistatikos uždavinys*.



2.24 pav. Pjezoelektrinio keitiklio pereinamojo proceso charakteristika

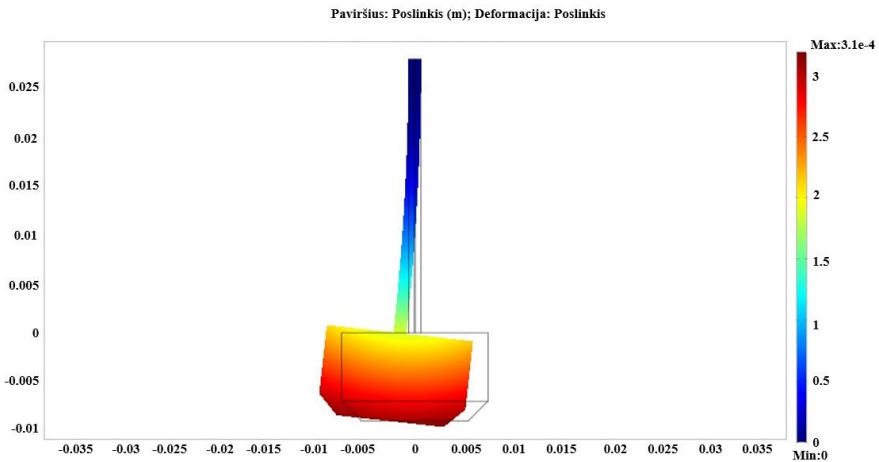
Ši 2.24 paveiksle vaizduojama pereinamojo proceso charakteristika gauta, kai aplinkos (oras) slopinimas $c=0$. Tai yra vaizdas, kuriame matyti kiek greitai virpesiai nuslopsta pjezoelektriniame keitiklyje davus jam pradinę impulsinę įtampą $U_j=66V$. Slopinimas vyksta ore, pjezoelektrinio keitiklio virpesiai ore slopsta dėl vidinio slopinimo koeficiento, vidinės trinties pjezokeitiklio medžiagoje:

$$c_{sum} = c_{aplinkos} + c_{pjezo} \cdot c_{oro} \ll c_{pjezo} \quad (2.25)$$



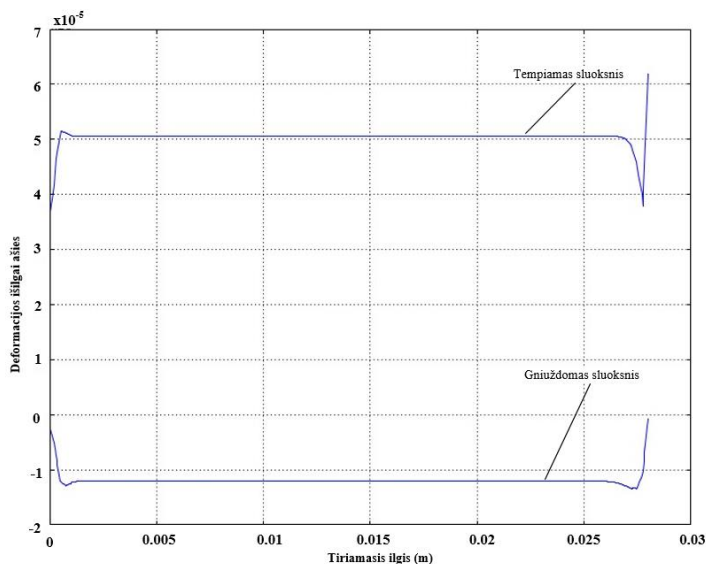
2.25 pav. Elektrinės įtampos lauko pasiskirstymas abiejuose pjezoelektrinio keitiklio sluoksniuose

Kitame 2.25 paveiksle vaizduojamas įtampos lauko pasiskirstymas tiek aktyviame, tiek pasyviame pjezoelektriniame keitiklyje. Pjezoelektrinio keitiklio valdymo įtampa $U_j=66$ V yra tiekiami į aktyvųjį pjezoelektrinį sluoksnį, kai elektros srovė nuolatinė, o klampumas $c=0$.



2.26 pav. Skersinių poslinkių lauko pasiskirstymas pjezoelektriniame keitiklyje ir kontaktiniame elemente

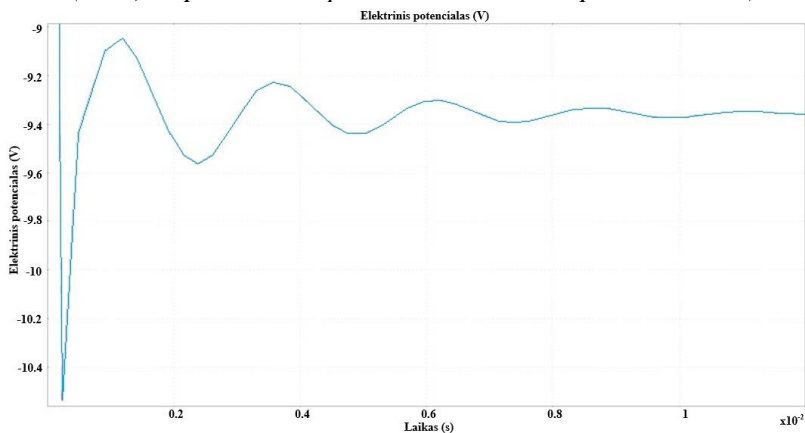
Pav. 2.26 vaizduoja pjezokeitiklio skersinių poslinkių lauką. Elektrinė valdymo įtampa $U_j=66$ V yra tiekiami į aktyvųjį pjezoelektrinį sluoksnį, kai elektros srovė nuolatinė, o aplinkos klampumas $c=0$.



2.27 pav. Lenkimo deformacijų pasiskirstymas pjezoelektrinio keitiklio ilgyje ($c=0$)

Aukščiau esanti kreivė, pav. 2.27 vaizduoja aktyvaus pjezoelektrinio sluoksnio deformacijų pasiskirstymą per visą sluoksnio ilgį. Toliau esanti kreivė vaizduoja neaktyvaus pjezoelektrinio keitiklio sluoksnio deformacijų pasiskirstymą per visą sluoksnio ilgį. Deformacijų dydžio santykis yra apie 5 kartai (aktyvaus bei pasyvaus sluoksnio).

Toliau sprendžiamas tas pats uždavinys pakeičiant vieną sąlygą ir pereinant nuo aplinkos (oras) slopinimo $c=0$ prie kito kraštinio slopinimo $c \gg 0$ (MRS).

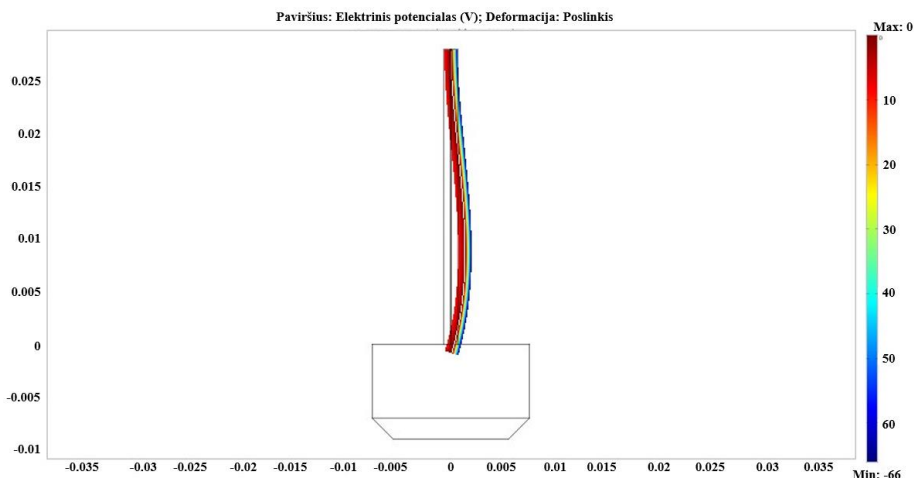


2.28 pav. Pjezoelektrinio keitiklio pereinamojo proceso charakteristika magnetoreologiniame skystyje

Šis 2.28 paveiksle vaizduojamas pjezoelektrinio keitiklio pereinamasis virpesių signalas, kai slopinimas yra pasirenkamas kaip santykinis dydis $c \gg 0$ (MRS). Tai yra

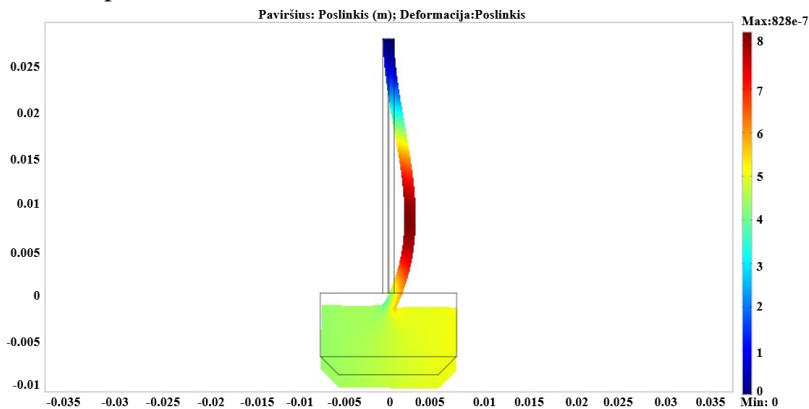
vaizdas, kuriame matyti kaip greitai virpesiai nuslopsta pjezoelektriniame keitiklyje davus jam pradinę impulsinę elektros įtampą $U_j=66V$.

Lyginant dvi pereinamojo proceso charakteristikas, kai slopinimas $c=0$ ir $C \gg 0$, aiškiai matomas skirtumas ir stiprus slopinimo poveikis.



2.29 pav. Įtamos laukas pjezoelektrinio keitiklio sluoksniuose

Paveiksle 2.29 pateiktas įtamos laukas tiek aktyviame, tiek pasyviame pjezoelektrinio keitiklio sluoksnyje. Pjezoelektrinio keitiklio valdymo įtampa $U_j=66V$ yra tiekiamą į aktyvųjį pjezoelektrinį sluoksnį, kai elektros srovė nuolatinė, o aplinkos klampumas $c \gg 0$.

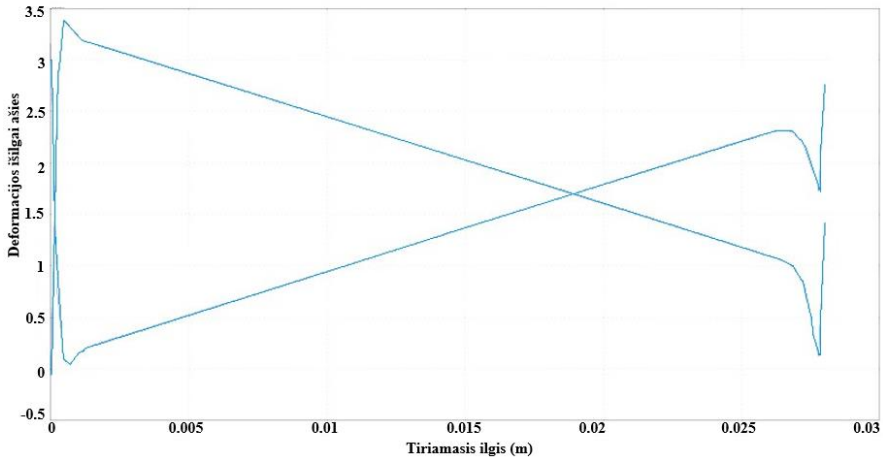


2.30 pav. Poslinkių laukas visame pjezoelektrinio keitiklio ilgyje įskaitant ir kontaktinį elementą

2.30 paveiksle pateiktas pjezokeitiklio skersinių poslinkių laukas. Didžiausi pjezoelektrinio keitiklio poslinkiai žymimi raudona spalva. Tuo metu mažiausi atsilenkimai bus prie įtvirtinimo. Pjezoelektrinio keitiklio valdymo įtampa $U_j=66V$

yra tiekiami į aktyvųjį pjezoelektrinį sluoksnį, kai elektros srovė nuolatinė, o aplinkos klampumas $c \gg 0$.

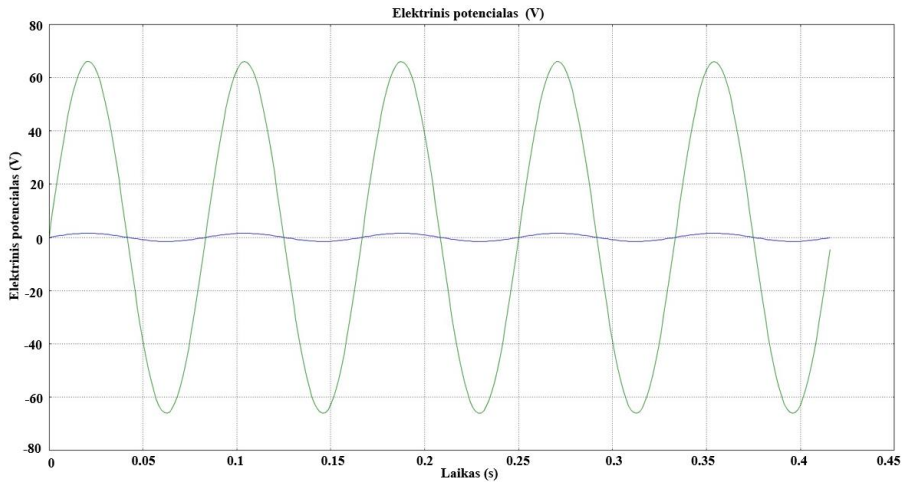
Lyginant poslinkių lauko pasiskirstymą esant skirtingiems slopinimams, matomas aiškus skirtumas. Kai slopinimas lygus 0, pjezoelektrinis keitiklio poslinkiai yra horizontalios krypties, o kai slopinimas $c \gg 0$, (mechaniniu požiūriu, kai vienas galas yra standžiai įtvirtintas, o kitas arti to įtvirtinimo), tai pjezoelektrinio keitiklio poslinkiai yra vertikalios krypties.



2.31 pav. Lenkimo deformacijų pasiskirstymas pjezoelektriniame keitiklyje ir kontaktiniame elemente ($c \gg 0$)

Prieš tai pateiktoje kreivėje (2.31 pav.) vaizduojamas aktyvaus pjezoelektrinio sluoksnio deformacijų pasiskirstymas per visą sluoksnio ilgį. Toliau esanti kreivė vaizduoja neaktyvaus pjezokeitiklio sluoksnio deformacijų pasiskirstymą per visą sluoksnio ilgį.

Kvazistatikos uždavinys. Pjezoelektrinis keitiklis veikia $f=10\text{Hz}$ dažniu, todėl dinamikos uždavinį reikia redukuoti ir spręsti kaip kvazistatinį uždavinį.



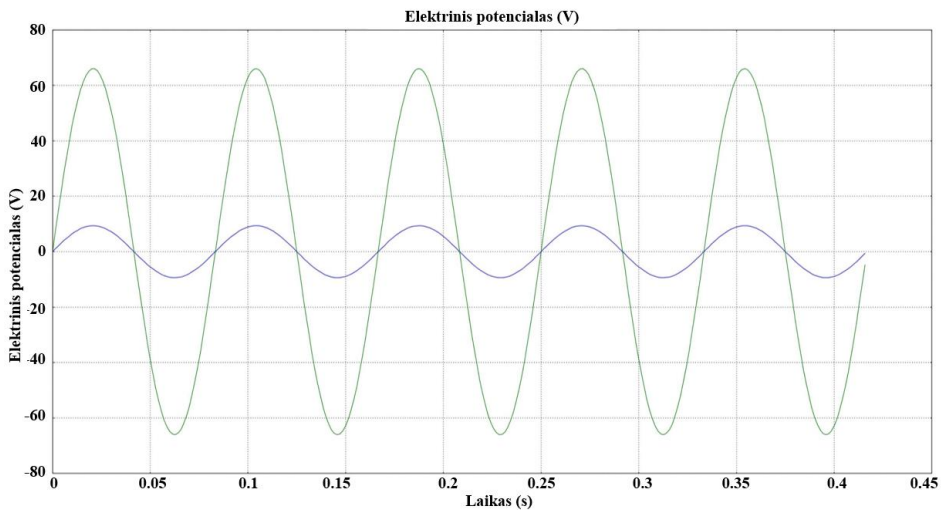
2.32 pav. Įtampos priklausomybė nuo laiko abiejuose pjezoelektrinio keitiklio sluoksniuose ($c=0$)

Pjezoelektrinio keitiklio valdymo įtampa $U_j=66\text{V}$, pjezokeitiklio virpesio dažnis $f=10\text{Hz}$, slopinimas $c=0$. Įtampos nuo laiko grafinėje priklausomybėje (2.31 pav.) žalios spalvos kreivė – tai keitiklio valdymo sluoksnio U_j įtampa, mėlynoji kreivė – tai jutiklio signalo U_s įtampa. Įtampų santykis:

$$\frac{U_j}{U_s} = \frac{66}{3} = 22 .$$

Pjezoelektrinio keitiklio valdymo įtampa $U_j=66\text{V}$, pjezokeitiklio virpesio dažnis $f=10\text{Hz}$, slopinimas $c \gg 0$. Įtampos nuo laiko grafinėje priklausomybėje (2.32 pav.) žalios spalvos kreivė – tai keitiklio valdymo sluoksnio U_j įtampa, mėlynoji kreivė – tai jutiklio signalo U_s įtampa. Įtampų santykis:

$$\frac{U_j}{U_s} = \frac{66}{10} = 6.6 .$$



2.33 pav. Įtampos priklausomybė nuo laiko abiejuose pjezoelektrinio keitiklio sluoksniuose ($c \gg 0$)

Atlikus tyrimus galima suformuluoti šių tyrimų išvadas.

2.3 Skyriaus apibendrinimas

- Sukurta magnetoreologinio skysčio reologinių parametrų tyrimo sistema, kurioje pasirinktas *bimorfo* tipo pjezoelektrinis keitiklis leido jį efektingai panaudoti tiek keitiklio, tiek ir jutiklio funkcijai.
- *Comsol Multiphysics 4.4* paketu atliktas gembiškaai įtvirtinto pjezoelektrinio *bimorfo*, kurio laisvas galas apkrautas tiriamo skysčio klampumo jėga, skaitinis modeliavimas,
- Nustatytos parinkto pjezokeitiklio dinaminės charakteristikos, gautos sužadintų poslinkių nuo veikiančių jėgų priklausomybės bei pjezokeitiklio sugeneruoto elektrinio signalo priklausomybė nuo jo laisvąjį galą veikiančios jėgos.

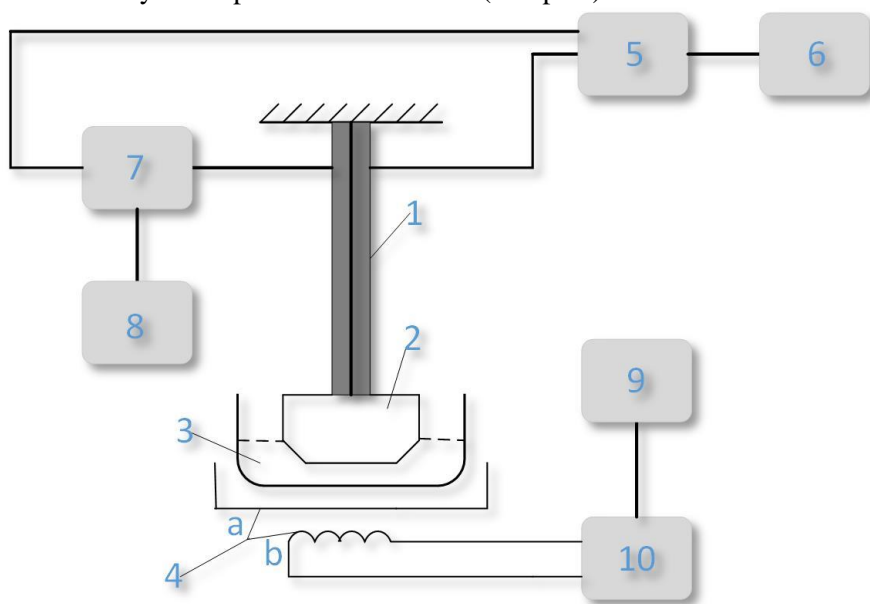
Norint nustatyti magnetoreologinio skysčio klampumą buvo suprojektuotas ir skaitiniu būdu ištirtas elektromagnetas bei parinktas ir, taip pat skaitiniu būdu, ištirtas lenkimo deformacijų keitiklis. Elektromagneto geometriniai parametrai leidžia 0,5 ml tūrio talpoje magnetinės indukcijos tankį varijuoti nuo 0 iki 1,2 T. Tolimesniame etape, remiantis modeliavimo rezultatais bus atlikti magnetoreologinio skysčio eksperimentiniai tyrimai.

3. MAGNETOREOLOGINIO SKYSČIO REOLOGINIŲ SAVYBIŲ EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

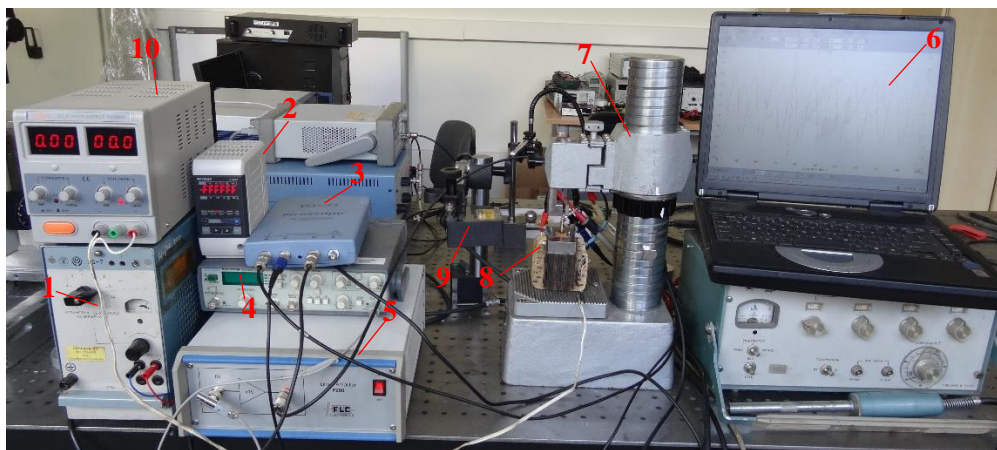
3.1 Magnetoreologinio skysčio savybių tyrimo eksperimentinis stendas

Skysčių reologinių savybių tyrimas – tai medžiagų deformacijos ir takumo tyrimas. Kiekvienas toks tyrimas tiesiogiai priklauso nuo tiriamosios medžiagos struktūros sudėtingumo. Disertacijos tiriamoji medžiaga – tai magnetoreologinis skystis, kuris yra struktūriškai sudėtinga tiriamoji medžiaga, kurioje yra nuo 3 μm iki 5 μm skersmens geležies dalelių. Šias daleles veikia gravitacijos jėga. Per sąlyginai trumpą laiką tos dalelės nusėda į skysčio tūrio apatinį sluoksnį – įvyksta sedimentacija. Šie skysčiai yra neniutoniai, todėl jų tyrimo galimybių ribos yra mažesnės. Šių skysčių medžiagos srautas negali būti ištirtas apibrėžiant viena – klampumo – vertę (pastovioje temperatūroje), nes jų klampumas keičiasi dėl išorinių aplinkybių, jų statinės ir dinaminės būklės. Pagrindinis šių skysčių reologinių savybių tyrimo aparatas yra reometras, struktūriškai sudėtingas įrenginys. Šiame darbe yra siūloma nauja tyrimo sistema, kuri pasižymi kompaktiška sudėtimi bei galimybe lokaliai pamatuoti skystį mažuose tūriuose. Tiriamasis magnetoreologinio skysčio tūris 0,4 ml yra pilamas į varinį 3,5mm pločio cilindrinį indą.

Magnetoreologinio skysčio reologinių savybių eksperimentiniams tyrimams atlikti buvo sudarytas eksperimentinis stendas (3.1 pav.).

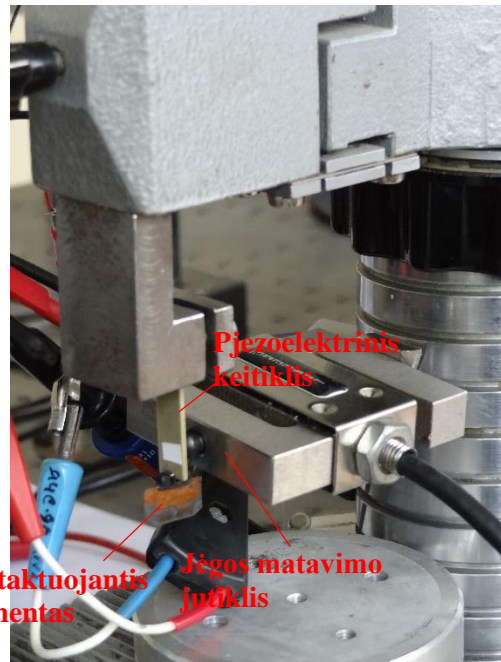
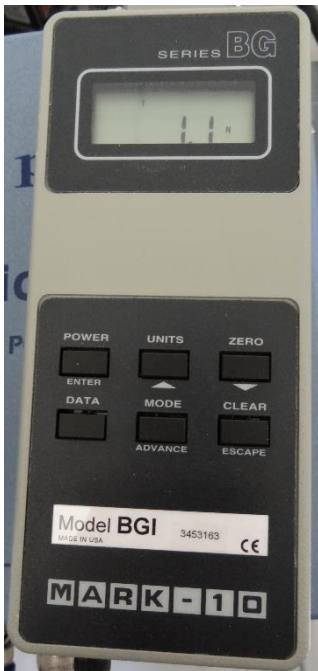


3.1 pav. Eksperimentinio stendo struktūrinė schema. Eksperimentinį stendą sudaro: 1 – gėmiškai įtvirtintas pjezoelektrinis keitiklis CMB05 (Noliac A/S); 2 – varinė plokštelė; 3 – magnetoreologinio skysčio talpa; 4 – elektromagnetas a-apvija, b – magnetolaidis; 5 – analoginis skaitmeninis konverteris PicoScope 3424; 6 – kompiuteris; 7 – stiprintuvas EPA104; 8 – signalų generatorius Agilent 33220A; 9 – ampermetras; 10 – maitinimo šaltinis



3.2 pav. Eksperimentinio stendo bendras vaizdas: 1 – maitinimo šaltinis B5 –7; 2 – lazerinio poslinkio matuoklio valdiklis LK – GD500; 3 – analoginio signalo keitiklis PicoScope 3424; 4 – generatorius ESCORT EGC 3235A; 5 – stiprintuvas Linear amplifier P200; 6 – kompiuteris; 7 – specialus metrologinis-laboratorinis stovas; 8 – elektromagnetas; 9 – lazerinis poslinkio matuoklis KEYENCE LKG82; 10 – nuolatinės srovės maitinimo šaltinis MASTECH HY500C

Norint atlikti paskutinį disertacinio darbo tyrimo etapą – patikrinti kuriamo dinaminio klampumo nustatymo įrenginio veikimą realiomis sąlygomis, buvo atliktas eksperimentinis tyrimas. Taip pat eksperimentinis tyrimas buvo atliktas siekiant eksperimentiškai patikrinti kuriamą dinaminio klampumo nustatymo įrenginį. Pjezoelektrinis keitiklis, kuris struktūrinėje schemoje (3.1 pav.) pažymėtas 1 numeriu, turi du valdymo kontūrus. Vienas iš jų yra keitklinis kontūras, skirtas aktyviam pjezoelementui. Kitas, jutiklinis, yra skirtas neaktyviam pjezoelementui. Keitklinis kontūras valdomas su generatoriumi 4 (3.2 pav.) ir stiprintuvu 5. Jutiklinis signalas matuojamas ir fiksuojamas su pikoskopu 3. Šis signalas yra gaunamas iš neaktyvaus pjezoelektrinio keitiklio sluoksnio. Lygiagrečiai pastarajam veiksmui matuojami pjezoelektrinio keitiklio atsilenkimai naudojant lazerinį poslinkio matuoklį 9. Jo prasmė šiame eksperimentiniame tyrime – pakartotinis ir labai tikslus pjezoelektrinio keitiklio atsilenkimo matavimas, kuriuo remiantis galima teigti, kad neaktyvus signalinis pjezoelektrinio elemento sluoksnis generuoja tikslius rezultatus. Šio prietaiso panaudojimas vienkartinis. Vėliau ištyrus sukurtos matavimo sistemos efektyvumą ir tikslumą jis nebebus naudojamas. Lazerinį poslinkio matuoklį valdo lazerinio poslinkio matuoklio valdiklis 2, iš kurio gaunamas signalas keliauja į analoginio signalo keitiklį 3. Elektromagneto 8 magnetinės indukcijos tankio dydis yra valdomas keičiant elektros srovės reikšmę nuo 0A iki 3A. Šis procesas yra valdomas paduodant elektros srovę iš nuolatinės elektros srovės maitinimo šaltinio 10. Visi duomenys yra siunčiami į kompiuterį 6, kuriame virpesių analizės programa *PicoScope* analizuoja gautus signalus iš pjezoelektrinio keitiklio valdymo kontūro, signalinio kontūro bei iš lazerinio poslinkio matuoklio.



3.3 pav. Blokavimo jėgos matavimo prietaisas MARK – 10 BGI

Norint priartėti prie dinaminio klampumo η – pagrindinio magnetoreologinio skysčio tiriamojo parametro, labai svarbu išmatuoti pjezoelektrinio keitiklio blokavimo jėgą U_{sbl} , nes remiantis pagrindine *Bingham* modelio formuluote, kuri yra išreikšta per jėgas F , galutiniame taške jų reikšmės bus reikalingos gauti metodinę kreivę [19]:

$$\tau_s = \tau_y + 2S\eta\dot{\gamma}. \quad (3.1)$$

kur – τ_s magnetoreologinio skysčio šlyties įtempimai; τ_y – magnetoreologinio skysčio takumo ribos įtempimai; $2S$ – kontaktuojančio elemento abiejų pusių paviršiaus plotas; η – dinaminis skysčio klampumas; $\dot{\gamma}$ – šlyties kitimo tempas.

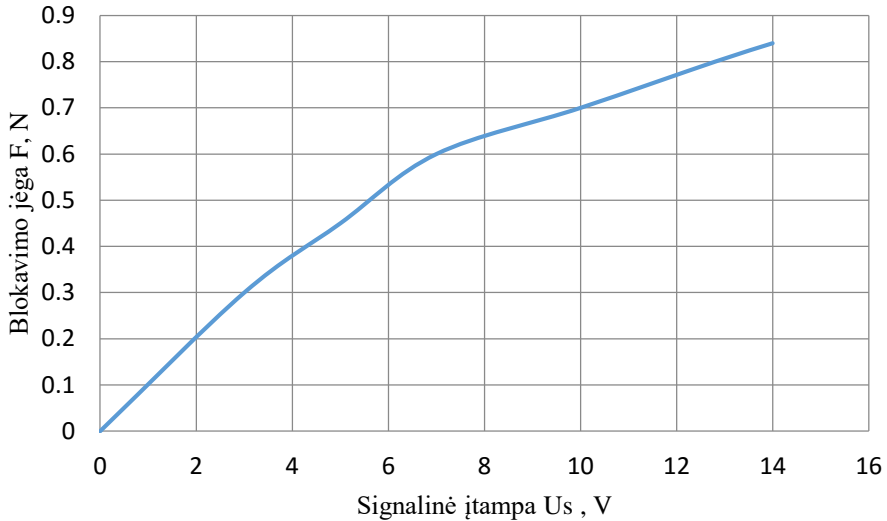
Remiantis priklausomybe 3.1, toliau gaunama šlyties jėgos priklausomybių matematinė išraiška:

$$F_s = F_y + 2S\eta\dot{\gamma}, \quad (3.2)$$

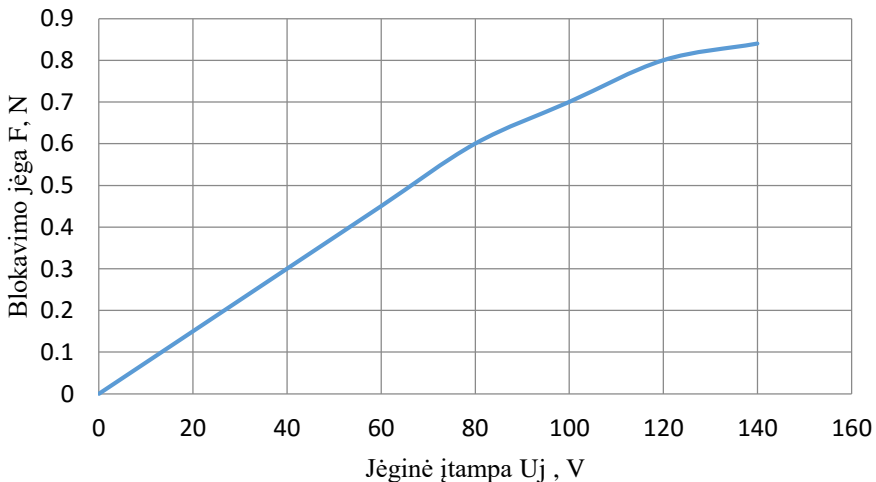
kur – F_s – šlyties jėga; F_y – takumo ribos jėga; $2S$ – kontaktuojančio elemento abiejų pusių paviršiaus plotas; η – dinaminis skysčio klampumas; $\dot{\gamma}$ – šlyties kitimo tempas.

Išmatuotoji blokavimo jėga – tai yra signalinio neaktyvaus sluoksnio jėga. Tai buvo eksperimentiškai atlikta su jėgos matavimo prietaisu *MARK – 10BGI*. Prie tiriamojo pjezoelektrinio keitiklio neaktyvaus sluoksnio buvo priglaustas jėgos matavimo prietaiso jutiklis, o į aktyvųjų pjezoelektrinių sluoksnių tiekiamas

pjezoelektrinio keitiklio valdymo įtampa, kuri kito ribose nuo 0V iki 140V. To rezultatas – neaktyviame sluoksnyje atsiradęs perduotas spaudimas iš aktyvaus pjezokeitiklio sluoksni, kurį skaitytuvai sugeneravo niutonais. Eksperimentinis bandymas atliktas ore, kai pjezoelektrinio keitiklio laisvasis galas su kontaktuojančiu elementu nebuvo panardintas į magnetoreologinį skystį.



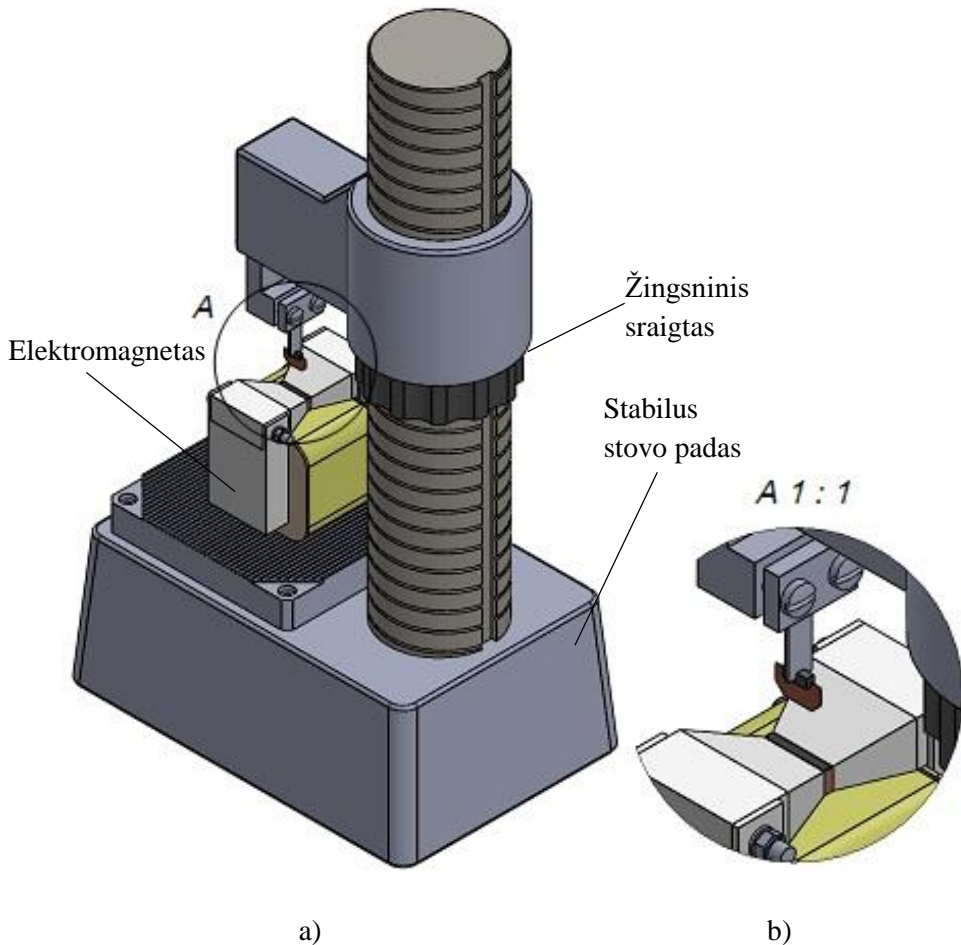
3.4 pav. Blokavimo jėgos priklausomybė nuo signalinės įtamos neaktyviame pjezoelektrinio keitiklio sluoksnyje



3.5 pav. Blokavimo jėgos priklausomybė nuo pjezoelektrinio keitiklio valdymo įtamos aktyviame pjezoelektrinio keitiklio sluoksnyje

3.4 paveiksle vaizduojama priklausomybė tarp išmatuotos jėgos ir U_{sbl} blokavimo įtampos atsirandančios neaktyviame pjezoelektrinio keitiklio sluoksnyje, kai aktyviame sluoksnyje įtampa kinta ribose nuo 0 iki 140 V. Kitame paveiksle (3.5 pav.) vaizduojama priklausomybė tos pačios išmatuotos jėgos nuo pjezoelektrinio keitiklio valdymo įtampos aktyviame pjezoelektrinio keitiklio sluoksnyje.

Bendras eksperimentinio stendo vaizdas pateiktas 3.2 paveiksle. Numeriu 7 ir 8 pažymėtos dalys yra centrinė ir pagrindinė eksperimentinio stendo dalis. Stovas turi dvi sraigtes pastūmas, viena jų grubesnio bei didesnio žingsnio, kita – smulkaus žingsnio (3.6 pav.).



3.6 pav. Pagrindinė eksperimentinio stendo tiriamoji – centrinė dalis, suprojektuota *SolidWorks* programa. a – bendras vaizdas stovo su elektromagnetu; b – išdidintas elektromagneto polių, magnetoreologinio skysčio talpos bei pjezoelektrinio keitiklio su kontaktuojančiu paviršiumi vaizdas

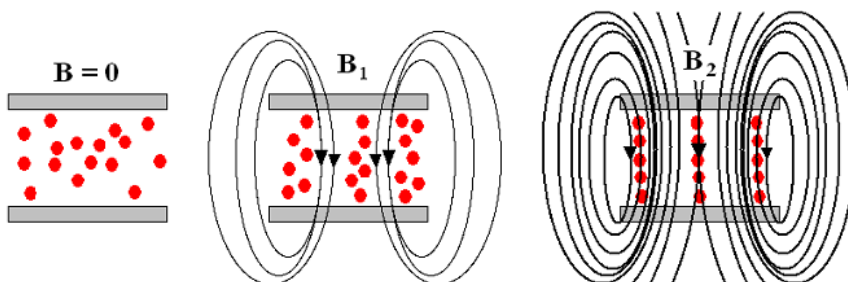
3.2 Elektromagneto magnetinių savybių nustatymas

Kaip jau buvo minėta anksčiau, tiriamieji magnetoreologiniai skysčiai priklauso neniutoninių skysčių grupei bei viskoplastinių skysčių pogrupiui. Šių skysčių reologinių savybių kitimas priklauso nuo išorinio poveikio ir laiko trukmės. Pavyzdžiui, tai pačiai grupei priklausantys elektoreologiniai skysčiai savo klampumą keičia nuo elektrinio lauko, o magnetoreologiniai skysčiai savo klampumą keičia nuo magnetinio lauko. Tad šiais atvejais išorinis poveikis bus elektrinis bei magnetinis laukas. Disertacinio darbo tiriamuoju atveju magnetinio lauko kūrimas vyko trimis etapais:

- iš pradžių analizuotas magnetinio lauko tyrimas teoriškai;
- toliau buvo atliekamas magnetinio kontūro projektavimas,
- ir paskutiniame etape pagamintas elektromagnetas tiksliai atitinkantis reikalavimus.

Magnetinio lauko tyrimas nagrinėjant literatūros šaltinius.

Teorinėje analizės dalyje remtasi vienu iš patikimiausių literatūros šaltinių, tai kompanijos *Lord*, kuri ir gamina šiuos skysčius, techninėmis charakteristikomis, nes tiriamieji skysčiai MRF – 122ED bei MRF – 140CG yra taip pat gaminti kompanijoje *Lord*.



3.7 pav. Magnetoreologinio efekto scheminis vaizdas, kai magnetinio lauko indukcija $B=0$ ir $B_2 > B_1$

Atlikus išsamią analizę paaiškėjo, kad norint pasiekti idealias sąlygas pakanka sukurti skystį veriantį magnetinį lauką, kurio magnetinės indukcijos $B(T)$ kitimo ribos yra nuo $0T$ iki $1,2 T$. To visiškai pakanka, kad šiame diapazone būtų galima stebėti efektyviai susiformuojantį ir pasiekiantį soties tašką magnetoreologinį efektą (3.7 pav.).

Magnetoreologiniame skystyje viena iš sudedamųjų komponentų yra feromagnetinės geležies dalelės, kurių vidinio magnetinio lauko indukcija šimtus ir net tūkstančius kartų viršija išorinio magnetinio lauko indukciją. Šių geležies dalelių magnetinė skvarba yra didelė. Dėl šios savybės net ir labai silpname magnetiniame lauke ($B_0=10^{-3} T$) geležies dalelės stipriai įsismagnetina. Dar kitaip dalelių įsmagnetinimą galima aprašyti santykiu: magnetinės indukcijos B geležies dalelėse ir

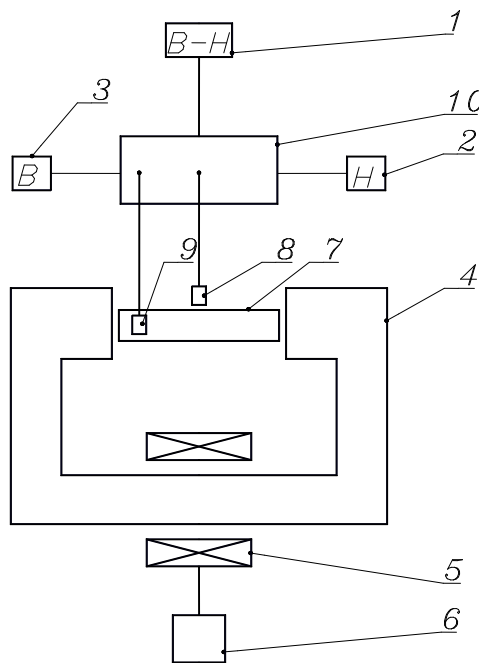
magnetinės indukcijos B_0 vakuume, kurio santykio išraiška lygi santykinei magnetinei skvarbai [82]:

$$\mu = \frac{B}{B_0} . \quad (3.3)$$

Kiekvienam feromagnetikui yra būdinga temperatūra, kurią viršijus jis virsta paramagnetiku (antros rūšies fazinis virsmas). Ši temperatūra vadinama Kiuri tašku. Todėl visi feromagnetikai anksčiau minėtomis savybėmis pasižymi tik esant temperatūrai, žemesnei už Kiuri tašką. Geležies Kiuri taškas $129,85^\circ\text{C}$, nikelio – $357,85^\circ\text{C}$, kobalto – $1156,85^\circ\text{C}$.

Taip pat buvo atliktas eksperimentinis tyrimas norint gauti eksperimentinę $B - H$ kreivę dviejų tiriamųjų magnetoreologinių skysčių. Šiam eksperimentui atlikti panaudotas magnetinių savybių matavimo įrenginys, kuriame yra du Holo efekto jutikliai.

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (3.4)$$



3.8 pav. Magnetoreologinio skysčio magnetinių savybių tyrimo įrenginio struktūrinė schema: 1 – diferencialinio stiprintuvo išėjimo signalas; 2 – įėjimas iš holo jutiklio 8; 3 – įėjimas iš holo jutiklio 9; 4 – magnetolaidis; 5 – elektromagneto apvija; 6 – elektromagneto maitinimo šaltinis; 7 – indas su magnetoreologiniu skysčiu; 8 ir 9 – Holo jutikliai; 10 – diferencialinis stiprintuvas [57]

Holo reiškinių esmė yra ta, kad laidininke, kuriuo teka srovė, sudarius magnetinį lauką, kurio magnetinė indukcija B statmena srovės tankio vektoriui j , atsiranda

skersinis elektros laukas. Jo stiprumo vektorius \vec{E} yra statmenas vektoriams \vec{j} ir \vec{B} . Reiškinyms paremtas judančių elektros krūvių sąveika su išoriniu magnetiniu lauku. Kai elektros krūvis q juda greičiu v magnetiniame lauke, jį pradeda veikti Lorencio magnetinė jėga [83].

3.8 paveiksle pateiktas magnetoreologinių skysčių magnetinių savybių tyrimo įrenginys. Jis buvo naudojamas papildomai ištirti jau turimų *Lord* kompanijos ir naujai kuriamų magnetoreologinių skysčių magnetinių savybių nustatymui. Apie magnetoreologinių skysčių tobulinimą bei sedimentacijos problemos eliminavimą yra aprašoma 4 disertacijos skyriuje.

Dviejų tiriamųjų skysčių įmagnetinimo kreivės buvo gautos iš matavimų su dviem Holo jutikliais. Magnetinio lauko indukcija B_0 ore yra išmatuojama su Holo jutikliu 8. Magnetinio lauko stipris yra apskaičiuojamas [84]:

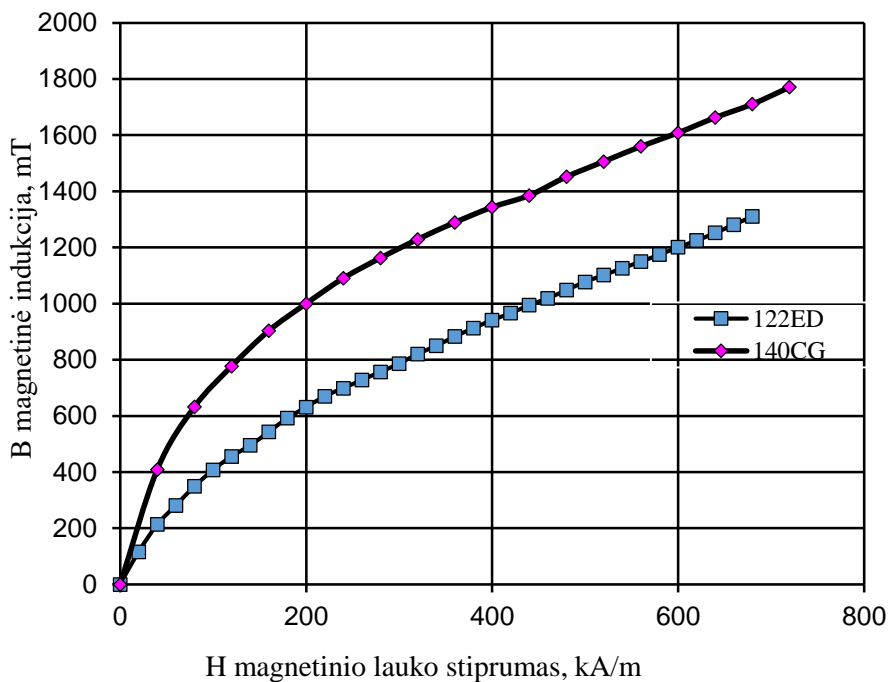
$$H = B_0 / \mu_0 \text{ (išorinis laukas),} \quad (3.5)$$

kur, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m magnetinė skvarba vakuume jos dydis nekintantis, konstanta, Holo jutiklis 9 išmatuoja tiriamojo magnetoreologinio skysčio magnetinę indukciją B (vidinis laukas). Magnetoreologinio skysčio magnetinė indukcija B yra didesnė už oro magnetinę indukciją B_0 . Magnetinio lauko indukcija magnetoreologiniame skystyje apskaičiuojama [84]:

$$B = \mu_0(J + H) \text{ (vidinis laukas),} \quad (3.6)$$

kur, J – tai įmagnetėjimas. Dėl tiriamojo skysčio indo geometrijos, kai jo ilgis yra daug kartų didesnis, magnetinių laukų išsiskraipymas yra neįmanomas. Tuomet, kai turime $\mu_0 H$ iš jutiklių 8 ir 9 galima nustatyti įmagnetinimą [84]:

$$J = (\mu - 1)H \text{ arba } B = \mu_0 \mu H. \quad (3.7)$$

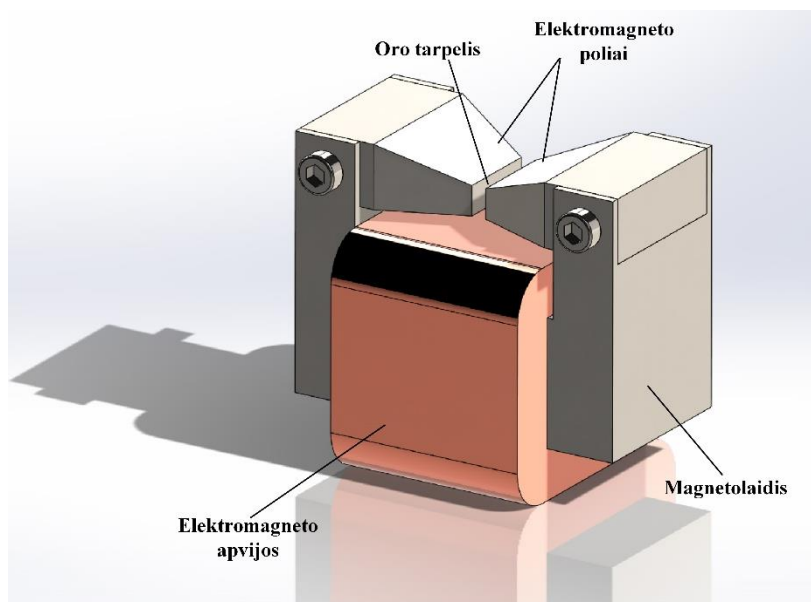


3.9 pav. Eksperimentinė magnetoreologinių skysčių B – H kreivė

Gauta eksperimentinė dviejų magnetoreologinių skysčių (MRF – 122ED; MRF – 140 CG) įmagnetinimo kreivės B – H (3.10 pav.) savo forma ir skaitinėmis vertėmis yra labai artima teorinei.

Magnetinio kontūro rinkimas.

Nuodugniai išnagrinėjus įvairius literatūros šaltinius gauta išvada, kad geriausiai eksperimentiniams tyrimams tiktų C formos elektromagnetas su 3,5 mm tarpeliu bei specialios formos poliais (aptarti toliau). Siekiamybė oro tarpelyje gauti magnetinės indukcijos dydį siekiantį $B=1T$. Parenkant elektromagneto matmenis labai svarbus geometrinis tarpelio matmuo, kuris tiesiogiai yra siejamas su matuojamo reologinio skysčio tiriamuoju tūriu. Svarbus disertacijoje iškeltas uždavinys – konstrukcijos ir tiriamosios medžiagos suminis ekonominis rodiklis, t. y., kad tiriamasis eksperimentinis stendas būtų ekonomiškai palankus. Magnetoreologinis skystis yra santykinai brangi medžiaga (660 EUR vieno litro kaina), todėl jos tyrimams naudota $V=0.4ml$. Sekant ekonominius rodiklius bei remiantis magnetinių laukų nuostolių eliminavimu, oro tūrinis tarpelis buvo sumažintas iki reikiamo tiriamajam reologiniam skysčiui (kai tiriamajame elektromagneto tarpelyje pasiekama magnetinės indukcijos reikšmė $B\sim 1T$).



3.10 pav. SolidWorks programinio paketo terpėje suprojektuotas elektromagnetas

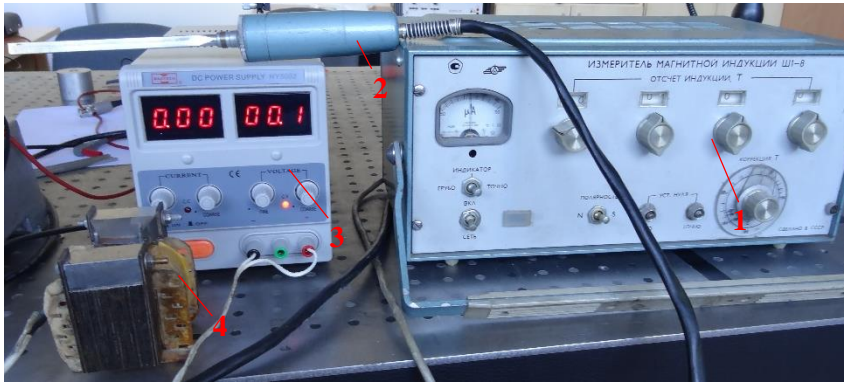
Naudojant klasikines elektromagnetizmo formules ir remiantis elektromagneto forma, geometrija bei nustatytu elektromagneto apvijų skaičiumi $N=750$ buvo apskaičiuotas galimas magnetinės indukcijos dydis.

Magnetinės indukcijos oro tarpelyje skaičiavimas esant maksimaliai $I=3A$ elektros srovei elektromagneto apvijose [85]:

$$B_{oro} = \mu_{oro}\mu_0 \frac{NI}{l} = 1 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{750 \cdot 3}{3 \cdot 10^{-3}} = 0.942 T. \quad (3.8)$$

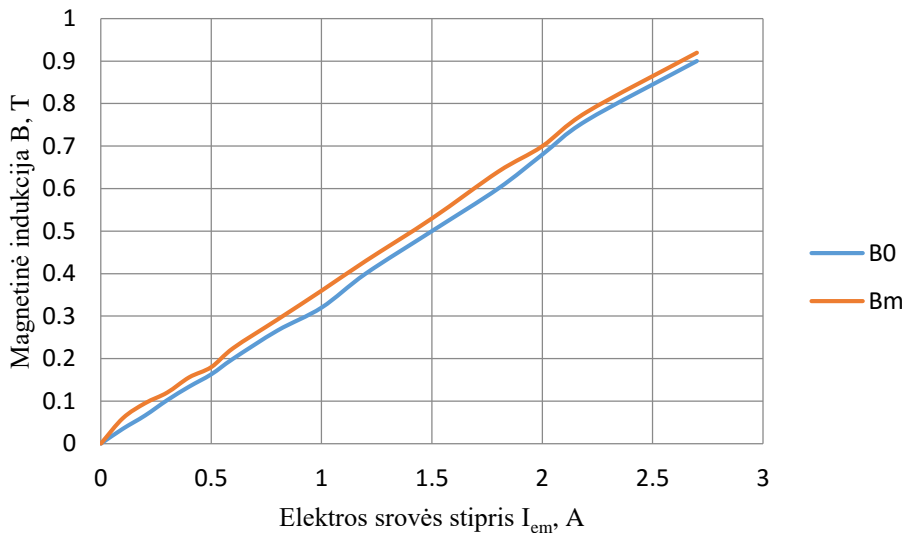
Magnetinės indukcijos dydis $B=0.942 T$ artimas siekiamam $B=1T$ dydžiui. Daroma pagrįsta prielaida, kad analizuotas ir projektuotas elektromagneto variantas yra tinkamas tolimesniems tyrimo etapams ir testuojamas jis eksperimentiškai.

Elektromagneto magnetinės indukcijos dydis tiek oro tarpelyje tiek magnetoreologiniame skystyje buvo išmatuotas su magnetinio lauko tankio matavimo prietaisu Š1-8.



3.11 pav. Magnetinio lauko tankio matuoklis. Eksperimentinis stendas: 1 – magnetinio lauko tankio matavimo aparatas Š1 – 8; 2 – zondas; 3 – nuolatinės srovės maitinimo šaltinis MASTECH HY500C; 4 – elektromagnetas su oro tarpeliu ir magnetoreologiniu skysčiu

Atlikus eksperimentinius bandymus, kai elektros srovė, tekanti elektromagneto apvijomis kito nuo 0 A iki 3A su oro tarpeliu, gauti tokie rezultatai:



3.12 pav. Magnetinės indukcijos priklausomybė nuo elektros srovės, kai elektromagneto tarpelyje oras ir magnetoreologinis skystis. B_0 – oro terpė; B_m – magnetoreologinio skysčio terpė

Eksperimentinės kreivės dar kartą patvirtina, kad oro tarpelyje magnetinė indukcija $B=0.95$ T. Magnetinio kontūro analitika, jo projektavimas ir matavimai atlikti eksperimentiškai, patvirtina tikslius gautus rezultatus:

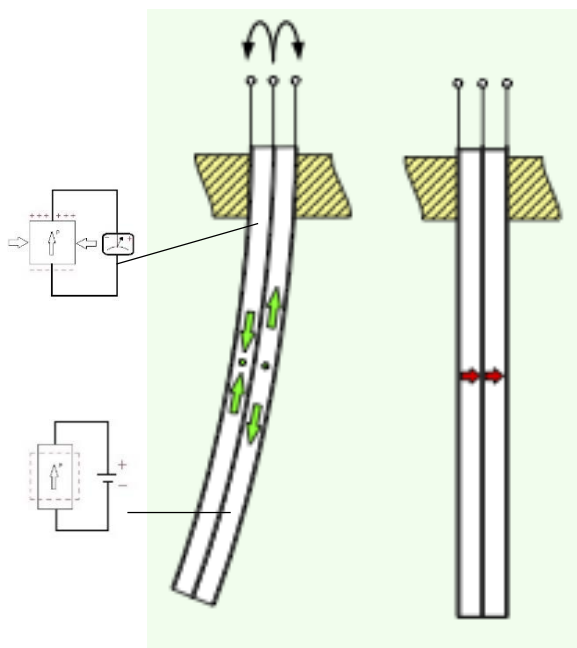
$$B_{analitinis} = 1 \text{ T} \sim B_{skaičiuojamas} = 0.942 \text{ T} \sim B_{comsol \text{ modeliuotas}} = 1.15 \text{ T} \sim B_{eksperimentinis} = 0.95 \text{ T}.$$

3.3 Pjezoelektrinio keitiklio kontaktuojančio elemento eksperimentinis parinkimas

Eksperimentinio stendo struktūrinėje schemoje (3.1 pav.) yra vaizduojamas 1 – gembiškai įtvirtintas pjezoelektrinis keitiklis. Šis keitiklis yra pagamintas iš dviejų keramikos sluoksnių, kurių storis yra 67 μm . Tai yra standartas norint pasiekti amplitudinius atsilenkimus, kai yra labai nedidelės jėginės įtampos. Maksimalūs atsilenkimai yra $\pm 345 \mu\text{m}$. Blokuojanti jėga yra 2,25N.

Pjezoelektrinis keitiklis yra sudarytas iš trijų sluoksnių. Du iš jų: viršutinis ir apatinis – pjezoelementai, padengti elektrodais. Trečiasis vidurinis – epoksidiniai klėjai.

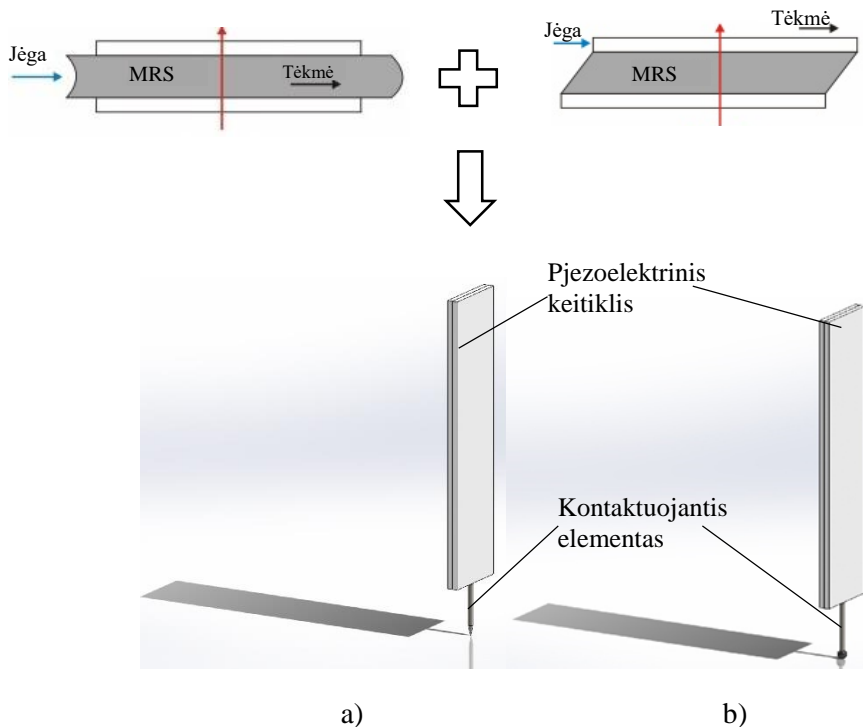
Eksperimentinio tyrimo metu naudojamas gembiškai įtvirtintas pjezoelektrinis keitiklis. Vienas jo sluoksnis yra aktyvus, į kurį yra paduodama įtampa, o kitas jo sluoksnis yra neaktyvus. Dirbant šiuo režimu pasireiškiantis pjezoelektrinis efektas yra ir tiesioginis, ir atvirkštinis. Aktyvusis sluoksnis veikia atvirkštiniu pjezoefektu, kai veikiant elektriniam signalui generuojami mechaniniai virpesiai. Pasyvusis pjezoelementas veikia tiesioginiu pjezoefektu, kai veikiant deformacijoms kūnas įsielektrina.



3.13 pav. Pjezoelektrinio bimorfinio vykdiklio veikimo principas [62]

Kuriant magnetoreologinio skysčio reologinių savybių testavimo sistemas buvo parinkinėjamas pats tinkamiausias darbinis paviršius, t. y. kontaktuojantis su magnetoreologiniu skysčiu elementas arba kitaip kontaktuojantis elementas (KE), kuris yra kljuojamas prie pjezoelektrinio keitiklio galo ir turi tiesioginį sąlytį su skysčiu. Taip pat yra svarbus kontaktuojančio elemento panardinimo gylis. Labai

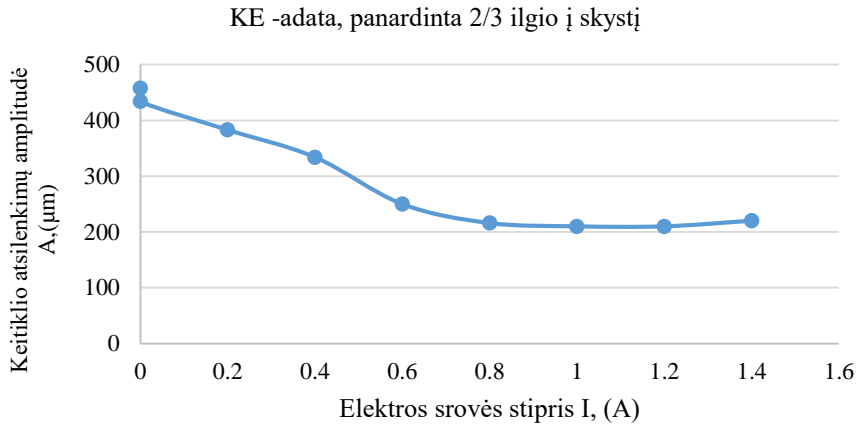
svarbus eksperimentinis dėmuo yra KE forma bei dydis. Eksperimentiniams bandymams buvo pasirinkta keletas variantų. Pasirenkant KE formą atsižvelgta ir į magnetoreologinio skysčio darbo režimus. Pirmuoju atveju buvo pasiūlyti du kontaktuojančio elemento variantai, kurie veikia jungtiniu režimu, vožtuvo bei šlyties režimu, nes kontakto su magnetoreologiniu skysčiu metu vyksta tiek skysčio stūmimas į priekį, tiek šoninis kontaktuojančio elemento ir skysčio sluoksnių šlyties efektas.



3.14 pav. Pjezoelektrinio keitiklio kontaktuojančio elemento geometrinės formos, projektuotos *SolidWorks* inžinerinio projektavimo paketu: a) adata, kurios ilgis 6mm; b) adata su plastikiniu sferinės formos KE, adatos ilgis 6mm, KE skersmuo 1mm

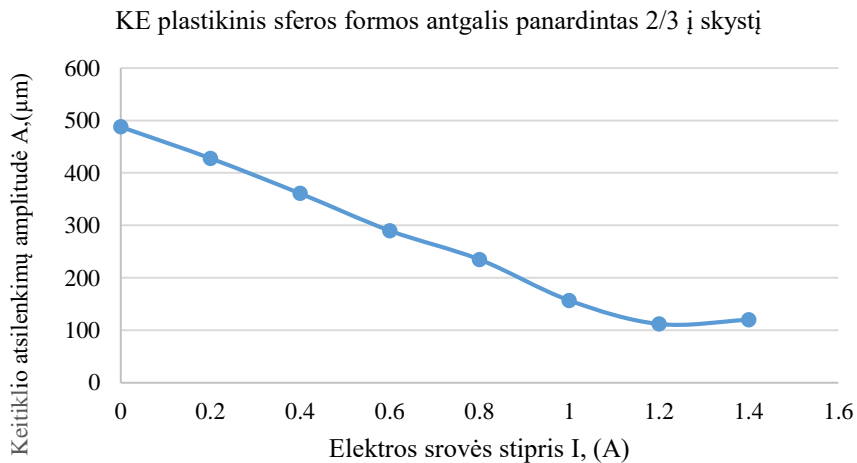
Abiejų kontaktuojančių elementų: adatos ir sferinės formos kontaktuojančio elemento veikimas magnetoreologiniame skystyje yra sudėtinis, dviejų darbo režimų rezultatas. Atliekant eksperimentus buvo varijuojamas pamerkimo gylis. Adata buvo merkiama $2/3$ savo viso ilgio, plastikinis sferinis KE buvo merkiamas $2/3$ savo skersmens bei liečiamas prie skysčio tik paviršiumi. Eksperimentas buvo atliekamas, kai pjezokeitiklio rezonansinis dažnis $f=127\text{Hz}$, pjezoelektriniam keitikliui dirbant rezonansiniu režimui. Pjezoelektrinio keitiklio valdymo įtampa aktyviajame pjezoelemento sluoksnyje yra $U_j=160\text{V}$. Remiantis gausiais eksperimentiniais rezultatais vaizduojama charakteringa kreivė (3.15 pav.). Joje aiškiai matyti efektyvios ir neefektyvios tyrimo vietos, kai esant tam tikram klampumui, t. y. kai į

elektromagneto ritės apvijas pradeda tekėti elektros srovė $I > 0,5A$, metrologinis matavimas nebetenka prasmės.



3.15 pav. Pjezoelektrinio keitiklio, kurio kontaktuojantis elementas – adata, atsilenkimų amplitudės priklausomybė nuo elektros srovės elektromagneto apvijoje

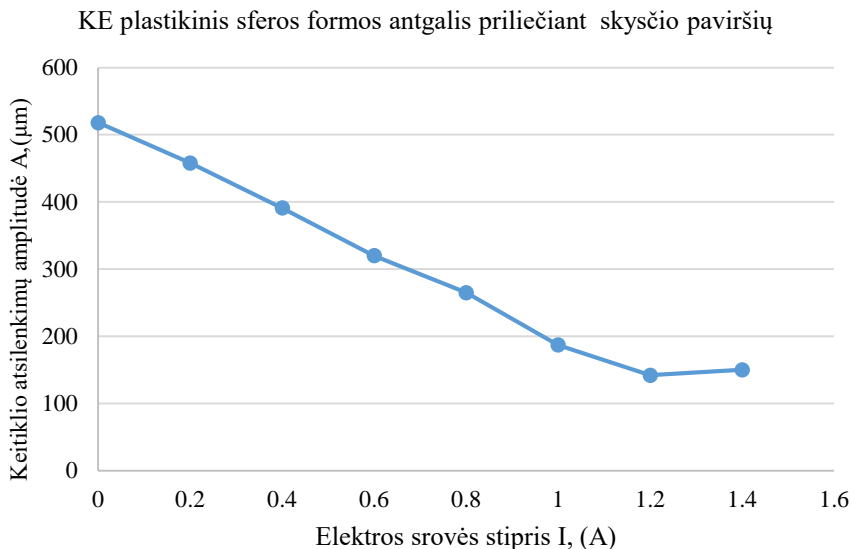
Vizualinis eksperimento stebėjimas parodė, jog esant dalinai susiformavusiam magnetoreologiniam efektui, kai reologinis skystis pasiekia vidutinį klampumą, adata prastumo griovelį. Kadangi pjezoelektrinis keitiklis veikia rezonansiniu dažniu, reologinis skystis nebespėja grįžti į pradinę takumo būklę ir pilnai neužpildo griovelio. Tokio bandymo tiriamosios ribos yra labai siauros. Toliau atliekami eksperimentiniai bandymai, kai kontaktuojantis elementas iš adatos yra pakeičiamas į adatą su sferiniu plastikiniu burbuliuku.



3.16 pav. Pjezoelektrinio keitiklio, kurio kontaktuojantis elementas sferinės formos antgalis, atsilenkimų amplitudės priklausomybė nuo elektros srovės elektromagneto apvijoje

Šio eksperimentinio bandymo sąlygos tokios pačios kaip ir prieš tai aprašytojo. Panašus reiškinys vyksta ir tada, kai kontaktuojantis elementas yra apvalus sferinis burbuliukas. Kadangi jo forma yra aptaki, tai metrologinės matavimo ribos šiek tiek padidėja. Eksperimentas buvo atliekamas, kai pjezokeitliklio rezonansinis dažnis $f=127\text{Hz}$. Pjezoelektriniam keitikliui dirbant rezonansiniu režimu, aktyviojo pjezoelemento sluoksnio įtampa – $U_j=160\text{V}$. Iš gausaus eksperimentinių rezultatų kreivių sudaryta charakteringa kreivė. Joje aiškiai matyti efektyvios ir neefektyvios tyrimo vietos, kai esant tam tikram klampumui, t. y., kai į elektromagneto ritės apvijas pradeda tekėti elektros srovė $I>0,8\text{A}$, metrologinis matavimas nebetenka prasmės.

Kitas matavimo galimybių plėtimo etapas – sumažinti valdymo įtampos reikšmes, esančias aktyviame pjezokeitliklio sluoksnyje $U_j=8\text{V}$. Kontaktuojančiu elementu yra paliekamas tas pats sferos formos antgalis. Jo įmerkimo gylis yra sumažinamas iki minimalaus, t. y. burbuliuko liestinę glaudžiant prie tiriamojo skysčio. Eksperimento rezultatai gaunami tokie:



3.17 pav. Pjezoelektrinio keitiklio, kurio kontaktuojantis elementas sferinis plastikinis KE, atsilenkimų amplitudės priklausomybė nuo elektros srovės elektromagneto apvijoje

Šiuo tiriamuoju atveju tyrimo ribos nepadidėjo. Šis eksperimentinis tyrimas atskleidžia efektyvias ir neefektyvias matavimo zonas. Jos pasiskirsto: efektyvi matavimo zona, kai elektros srovės dydis elektromagneto apvijoje kinta nuo 0A iki 0,3 A. Kai $I>3\text{A}$, matavimo rezultatų patikimumas mažėja didėjant elektros srovei.

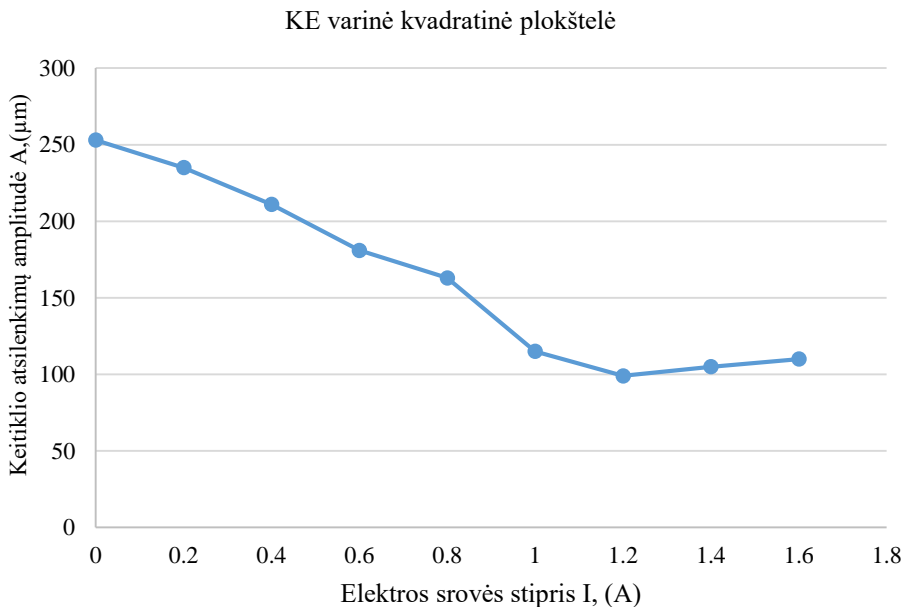
Kiti eksperimentiniai sprendimai – buvo pasiūlytos dar dvi kontaktuojančio elemento geometrijos esant skirtingiems darbo režimams. Pirmasis iš šių dviejų bandymų veikia vožtuvo režimu. Kai kontaktuojantis elementas visu savo darbinio plotu $S=4 \times 4=16\text{mm}^2$ (3.16 –3.18 pav.) stumia magnetoreologinį skystį, stabilus ir greitas skysčio aptekėjimas neįvyksta ir nuo elektros srovės $I=1.2\text{A}$ įvyksta „griovelio prasistumdymo“ reiškinys. Išsamiau apie šį reiškinį: didinat elektromagneto apvijomis tekančios elektros srovės reikšmę yra kuriami didesni magnetiniai laukai,

kurie didina magnetoreologinio skysčio klampumą. Pasiekus tam tikrą klampumo reikšmę skystis nebegeba per trumpą laiką grįžti į savo pradinę būseną ir toje vietoje atsiranda griovelis. Kai kontaktuojantis elementas juda, šiame griovelyje pjezoelektrinio keitiklio atsilenkimai išauga, nes sumažėja terpės pasipriešinimo jėgos (3.20 pav.). Kontaktuojantis paviršius yra varinė stačiakampė plokštelė 4mm x 4mm, kurios storis 1mm. Priklijavimo prie pjezokeitiklio kryptis pateikta 3.19 paveiksle.

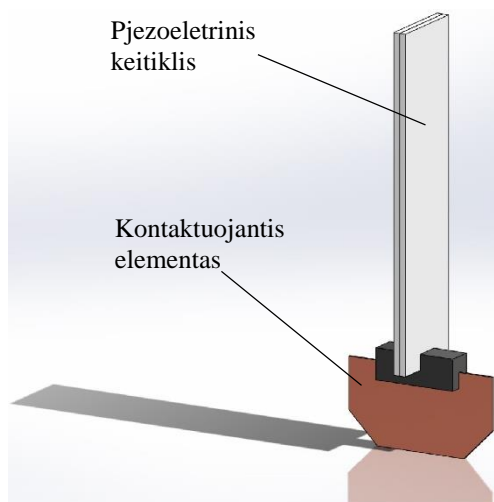
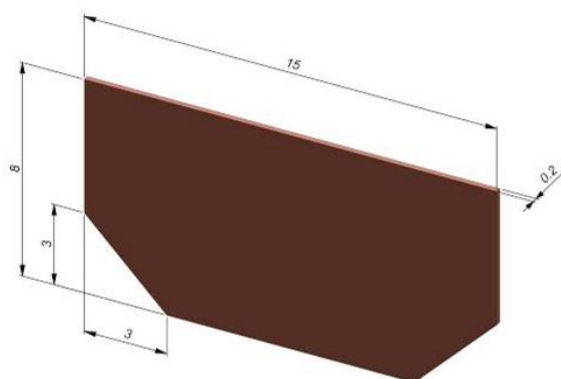


3.18 pav. Pjezoelektrinio keitiklio kontaktuojančio elemento geometrinė forma, veikianti vožtuvo režimu, projektuota *SolidWorks* inžinerinio projektavimo paketu.

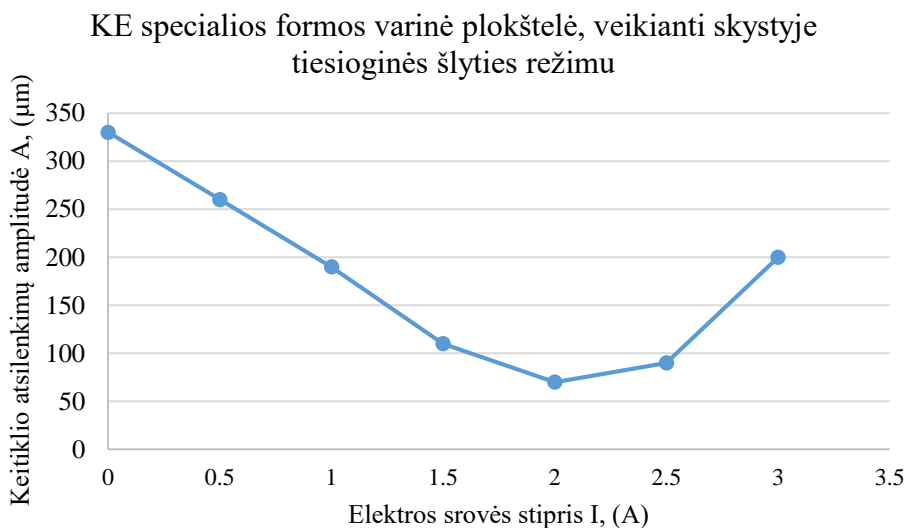
Atliktų eksperimentinių bandymų rezultatai pateikti paveiksle 3.19.



3.19 pav. Pjezoelektrinio keitiklio, kurio kontaktuojantis elementas keturkampė varinė plokštelė, atsilenkimų amplitudės priklausomybė nuo elektros srovės stiprio elektromagneto apvijose



3.20 pav. Pjezoelektrinio keitiklio kontaktuojančio elemento geometrinė forma, veikianti tiesioginės šlyties režimu, projektuota *SolidWorks* inžinerinio projektavimo paketu.



3.21 pav. Pjezoelektrinio keitiklio, kurio kontaktuojantis elementas specialios formos varinė plokštelė, atsilenkimų amplitudės priklausomybė nuo elektros srovės stiprio elektromagneto apvijose

Atlikus daugybę eksperimentinių matavimų su skirtingomis kontaktuojančio elemento formomis, tinkamiausiu kontaktuojančiu elementu buvo parinktas tiesioginės šlyties režimu veikiantis varinis, plonas, specialios geometrijos antgalis (3.20 pav. ir 3.21 pav.).

3.4 MRS reologinių parametrų eksperimentinių tyrimų metodika

Prieš tai esančiuose skyriuose aprašyta nuosekli eksperimentų eiga. Atliekant eksperimentinius tyrimus paaiškėjo, jog norint gauti efektyviai veikiančią ir lokaliai galinčią matuoti reologinių skysčių klampumo matavimo sistemą, tinkamiausia pjezokeitiklio su kontaktuojančiu elementu konstrukcija yra vaizduojama 3.23 paveiksle.



3.22 pav. Panardinto pjezoelektrinio keitiklio magnetoreologiniame skystyje išorinis vaizdas

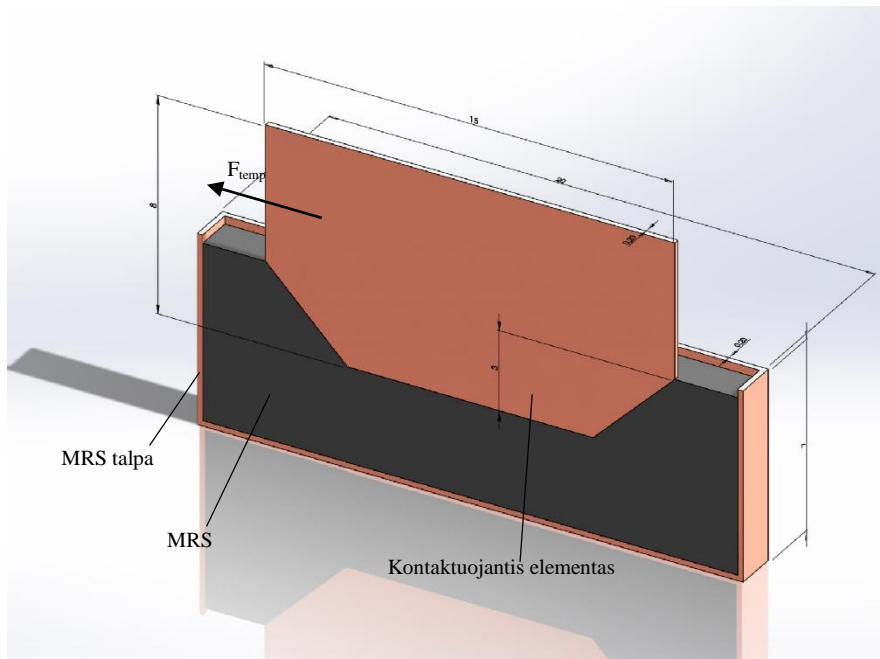
Todėl atraminių kreivių kalibravimui buvo panaudotas lazerinis poslinkio matuoklis. 3.22 paveiksle yra matoma reflektorinė plokštelė, kuri yra pritvirtinta prie pjezokeitiklio tam, kad būtų galima atlikti pjezokeitiklio poslinkio matavimus. Šoniniai kampai užtikrina plokštelės fiksavimo padėtį ties skysčio paviršiumi. Bendras kontaktuojančio elemento plotas apskaičiuojamas tokia tvarka:

$$S = S_{efektyvus} + S_{neefektyvus} \quad , \quad (3.9)$$

$$S = 15 \cdot 3 + \frac{9+15}{2} \cdot 5 = 45 + 60 = 105 \text{ mm}^2,$$

kur $S_{efektyvus}$ – pamerktoji į tiriamąjį skystį kontaktinio elemento dalis, $S_{neefektyvus}$ – ore esanti kontaktinio elemento dalis.

Tam, kad sistema veiktų tik tiesioginės šlyties režimu ir šoniniai plokštelės paviršiai tiriamuoju skysčiu keliautų pjovimo režimu išvystant kuo mažesnę pasipriešinimą, kontaktinio elemento storis buvo parinktas 0,2mm. Taip sudaromas pjovimo veiksmas šoniniu paviršiumi per tiriamąjį magnetoreologinį paviršių tose fazėse, kai skysčio klampumas didėja, o esant kitokio tipo kontaktuojantiems elementams, metrologinės reikšmės praranda tikslias matavimo reikšmes.



3.23 pav. Kontaktuojančio elemento, kai jis yra panardintas tiriamajame skystyje vertikalus pjūvis

Atlikus keletą bandymų, t. y. pamerkiant varinę plokštelę (KE) įvairiais gyliais, tinkamiausias būdas yra kai kontaktuojantis elementas yra merkiamas (kaip vaizduojama 3.23 pav.), t. y. iki linijos, kur keičiasi plokštelės geometrinė forma.

Kontaktuojantis elementas tiriamajame skystyje juda tam tikru greičiu, tam tikra kryptimi ir jį veikia tam tikra tempiančioji jėga [86]:

$$F_{temp} = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D 2S_{efekt}, \quad (3.10)$$

kur ρ – skysčio tankis; V – kontaktuojančio elemento greitis reliatyvus skysčio tėkmei; C_d – tempimo koeficientas; S_{efekt} – efektyvus kontaktinio elemento plotas.

Turint F_{temp} galima apskaičiuoti šlyties įtempimus, atsirandančius abiejuose kontaktuojančio elemento sąlyčio su magnetoreologiniu skystiu pusėse [86]:

$$\tau = \frac{F_x}{S_{efekt}}. \quad (3.11)$$

Kontaktuojantis elementas eksperimentiniams tyrimams pasirinktas atsižvelgiant į keletą veiksnių. KE dydis ir forma jau aprašyta anksčiau (tai buvo rinkta pagal tiriamojo skysčio tūrį, magnetolaidžio tarpelio dydį bei galimybę fiksuotis reikiamoje skysčio lygmens linijoje). Jo mažas storis pasirinktas todėl, kad gautųsi pjovimo efektas, bet ne vožtuvo režimas, kai plokštelė juda skystyje. Medžiaga, iš kurios buvo pagamintas kontaktuojantis elementas – varis. Varinės plokštelės paviršius yra nupoliruotas. Varis yra nemagnetinė medžiaga, kuri visiškai

nedaro įtakos magnetiniam laukui. Taip pat gaunamas maksimalus tiesioginės šlyties efektas, nes plokštelės paviršius yra glotnus ir paviršiaus vidutinis aritmetinis profilio nuokrypis $R_a=0,8 \mu\text{m}$. Tai puikiai atitinka keliamus reikalavimus, kada reikalingas nei itin glotnus, nei itin šiurkštus paviršius [85]. Abiem šiais atvejais yra sumažintas tiesioginės šlyties efekto dydis. Jei paviršius būtų pernelyg glotnus, tarp skysčio sluoksnių ir kontaktuojančio elemento sumažėtų pasipriešinimo jėgos. Antruoju atveju, jei paviršius KE būtų pernelyg šiurkštus, vyktų magnetoreologinio skysčio dalelių prilipimas prie KE ir pasipriešinimas dirbtinai padidėtų. Visa tai abiem atvejais neigiamai paveiktų eksperimentinio tyrimo rezultatus.

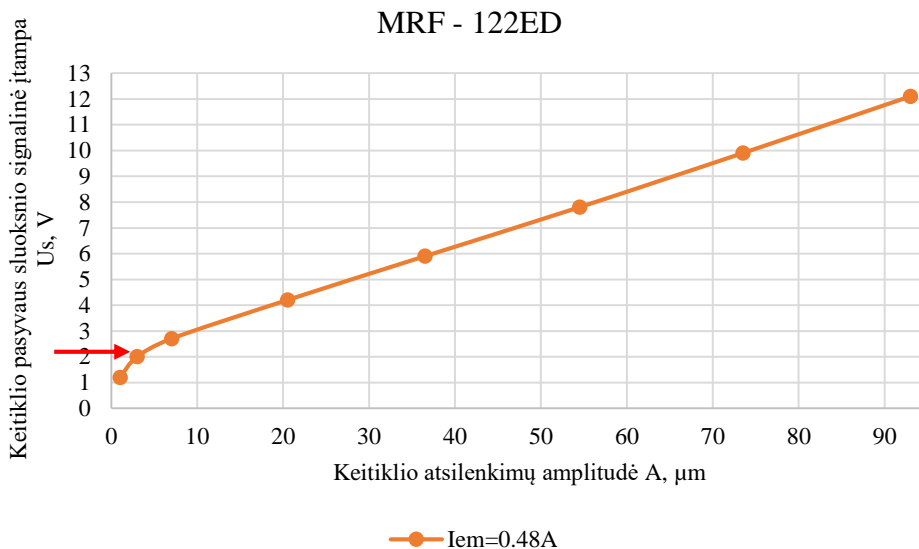
3.22 paveiksle aiškiai matomas realus eksperimento vaizdas. Viskas prasideda nuo to, kai tarp elektromagneto polių yra įstatoma talpa. Ši talpa, kurios tūris $V=0.5\text{ml}$, o medžiaga – varis, yra pripildoma magnetoreologiniu skysčiu, kurio supilamas tūris $V=0.4\text{ml}$. Panaudojant stovo dvigubo sraigto sistemą, pjezoelektrinis keitiklis ir jo kontaktuojantis elementas yra panardinamas į tiriamąjį skystį iki reikiamos ribos. Taip pradedami eksperimentiniai tyrimai. Elektromagneto apvijomis teka elektros srovė, kurios reikšmė kinta nuo 0 A iki 3 A kurdama magnetoreologiniame skystyje magnetinį lauką. Lygiagrečiai didėja skysčio klampumas. Taip pat į pjezoelektrinio keitiklio aktyvųjį sluoksnį yra paduodama U_j įtampa, kuri kinta ribose nuo 0V iki 160V, taip priversdama aktyvųjį sluoksnį išsilenkti ir tuo pačiu metu pasyvųjį sluoksnį gniuždytis. Gniuždomo sluoksnio rezultatas – generuojama signalinė įtampa U_s . Kai į pjezoelektrinio keitiklio aktyvųjį sluoksnį tiekama tam tikro dydžio įtampa U_j , pjezoelektriniame sluoksnyje yra generuojami įtempimai ir poslinkiai pjezoelektrinis keitiklis bando išsilenkti, bet ne iš karto tai pavyksta padaryti, nes magnetoreologinio skysčio klampumo laikančioji jėga yra didesnė už pjezokeitiklio pradinę pajudėjimo jėgą. Ir kai pereinama prie priešingos jėgų pusiausvyros, kontaktuojantis elementas nugali trinties jėgas ir pradeda judėti tiriamąja medžiaga. Tas momentas, kai KE pradeda judėti, yra vadinamas šlyties takumo riba τ_y . Už šios ribos atsiranda šlyties įtempimai, kai gretutiniai skysčio sluoksniai vienas kito atžvilgiu pajuda. Vyksta vidinė gretutinių sluoksnių trintis, tiesiogiai proporcinga skysčio klampumui. Kuo magnetoreologinis skystis yra veikiamas stipresniu magnetiniu lauku, tuo trintis tarp gretutinių skysčio dalelių auga. Vyksta magnetoreologinis efektas, geležies dalelės kabinasi viena su kita ir jungiasi į grandinėles. Vyksta kontaktuojančio elemento stabdymas, pasipriešinimas judesiui.

Skaičiavimams reikalinga τ_y reikšmė yra randama naudojantis *Bingham* modeliu. Ši reikšmė yra ties linkio tašku, po to linkio kreivė įgauna tiesioginio proporcingumo vaizdą. Tad sekant jos liestine, kaip 3.24 pav. yra žymima rodykle, yra nustatomas U_s taškas prie τ_y reikšmės.

Eksperimentinio tyrimo pagrindinis tikslas – nustatyti reologinio skysčio dinaminio klampumo radimo metodiką. Tokiu pačiu eiliškumu galima iširti dar vieną reologinio skysčio svarbų parametą – skysčio tankį ρ .

Atliekant bandymus, kai pjezoelektrinio keitiklio kontaktuojantis elementas yra pamerktas visu savo efektyviu plotu S_{efekt} į tiriamąjį magnetoreologinį skystį, gaunami rezultatai. Tai priklausomybės tarp U_s neaktyviame pjezoelektrinio keitiklio

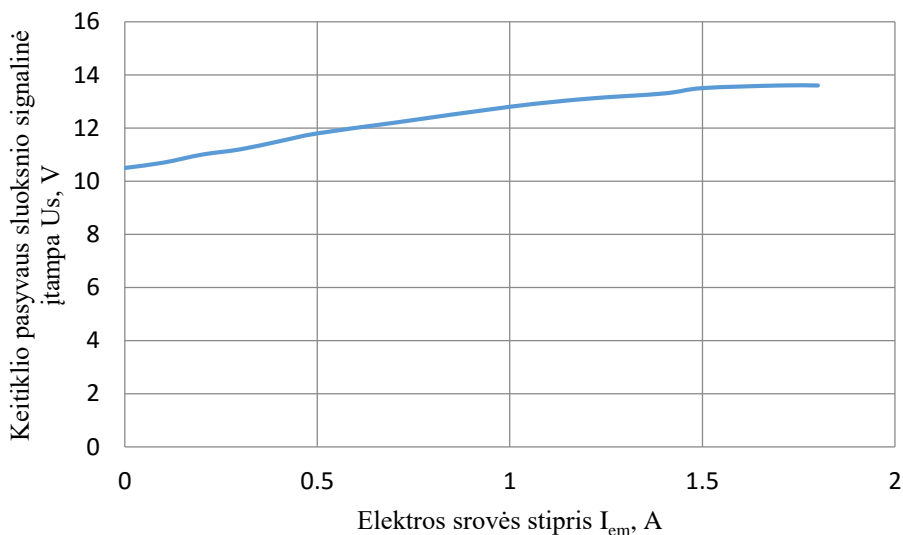
sluoksnyje ir I elektros srovės tekančios elektromagneto apvijomis. Pjezoelektrinio keitiklio valdymo įtampa aktyviame sluoksnyje yra $U_j=140V$ (3.25 pav.).



3.24 pav. Pjezoelektrinio keitiklio pasyvaus sluoksniu signalinės įtampos priklausomybė nuo keitiklio atsilenkimų amplitudės, kai elektromagneto apvijomis teka $I=0.48A$ stiprio srovė

3.24 paveiksle pateikti rezultatai ir kreivės forma yra atitinkamo *Bingham* modeliui (3.30 pav.). Šiame grafike pradiniai du taškai – tai taškai, kuriuose kontaktuojantis elementas nugalė vidines magnetoreologinio skysčio trinties jėgas, kurių dydis tiesiogiai priklauso nuo skystį veikiančios elektros srovės tekančios elektromagneto apvijomis didumo. U_s – tai signalinė atsako įtampa, išsiskirianti pasyviame pjezoelektrinio keitiklio sluoksnyje ir informuojanti apie skysčio klampumą esant atitinkamoms pamagnetinimo reikšmėms.

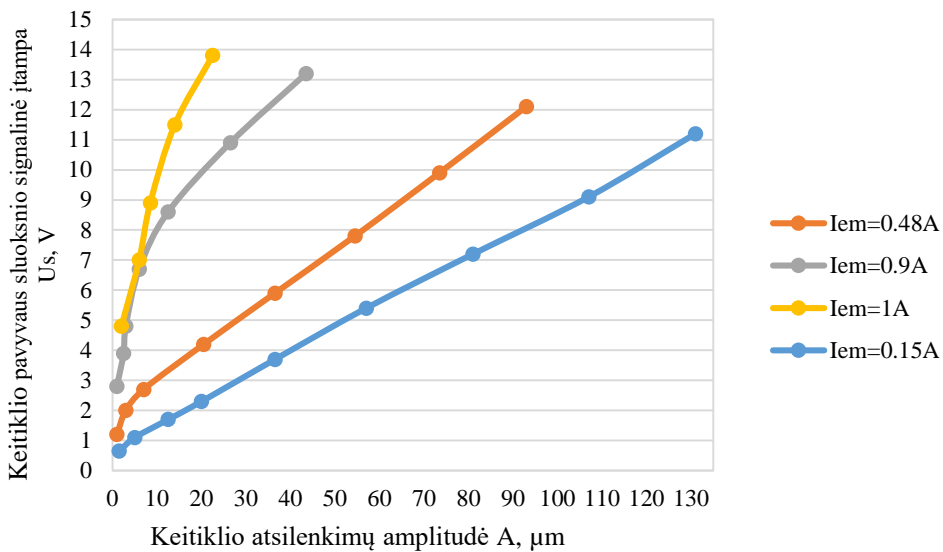
3.25 paveiksle vaizduojama kaip kinta signalinės įtampos dydis keičiant elektromagneto apvijomis tekančios elektros srovės reikšmes nuo 0A iki 1,8A. Grafike aiškiai matyti, kad magneto reologinis skystis jau turi pradinį savo klampumą ir pradinę signalinę įtampą 10,5V, kai elektromagneto apvijomis neteka elektros srovė. Vėliau ją didinant skysčio klampumas didėja lygiagrečiai didindamas pasipriešinimą dinaminiam pjezoelektrinio elemento judesiams ir pasyviame sluoksnyje vykstantis tempimas ir gniuždymas išskiria elektros krūvį, t. y. signalinę įtampą.



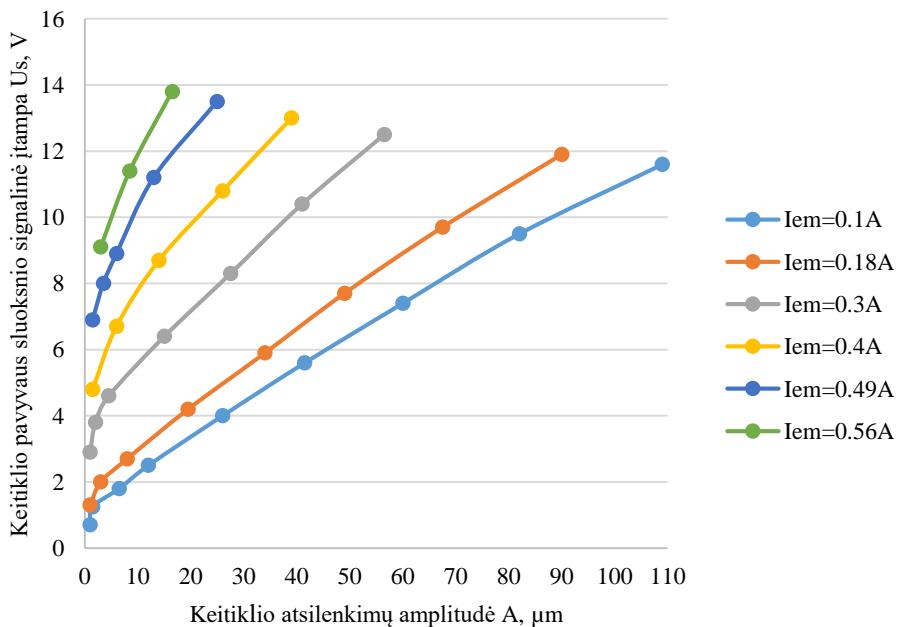
3.25 pav. Signalinės įtampos priklausomybė nuo elektros srovės tekančios elektromagneto apvijomis, kai žadinimo įtampa $U_j = const. = 140V$

Toliau panaudoti rezultatai gauti išmatuojant pjezoelektrinio keitiklio atsilenkimų amplitudę esant įvairioms eksperimento sąlygoms. Tyrimui pasirinkti du plataus matavimo diapazono grafikus, kurie vienas iš jų išmatuoto *Lord* kompanijos gaminamo skysčio MF – 122ED (geležies dalelių kiekis skystyje 72 %), kurio savasis klampumas, kai neveikia išoriniai veiksniai ir aplinkos temperatūra – 40 °C yra 0.060 ± 0.07 Pa·s. Antrasis šios kompanijos eksperimentinis magnetoreologinis skystis MF – 140CG (geležies dalelių kiekis skystyje 85.44 %), kurio savasis klampumas kai neveikia išoriniai veiksniai ir aplinkos temperatūra – 40 °C yra 0.28 ± 0.07 Pa·s. Taip gaunami kraštinių ribinių sąlygų rezultatai, iš kurių sudaroma viena bendra kraštinių sąlygų aproksimuota kreivė. Dvi pagrindinės ir atraminės kreivės, kurios nuolatos bus naudojamos tolimesniuose dinaminio klampumo skaičiavimo metodikos etapuose, tai yra jėgos priklausomybė nuo signalinės įtampos U_s bei pjezoelektrinio keitiklio atsilenkimų amplitudės priklausomybė nuo signalinės įtampos.

Paveikslai 3.26 ir 3.27 – tai dviejų skirtingų skysčių, su kraštinėmis klampumo reikšmėmis statinėje būsenoje.

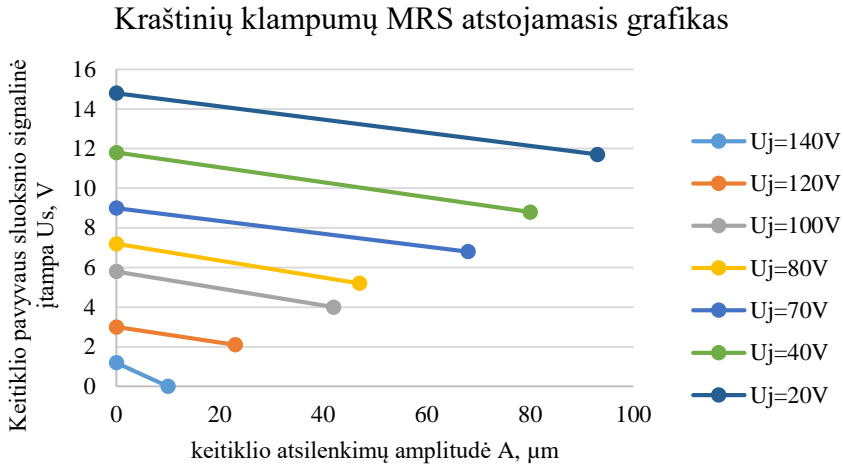


3.26 pav. Pasyvaus pjezoelektrinio keitiklio sluoksnio signalinės įtamos U_s priklausomybė nuo pjezoelektrinio keitiklio atsilenkimų amplitudės A . Tiriamasis skystis MRF – 122ED



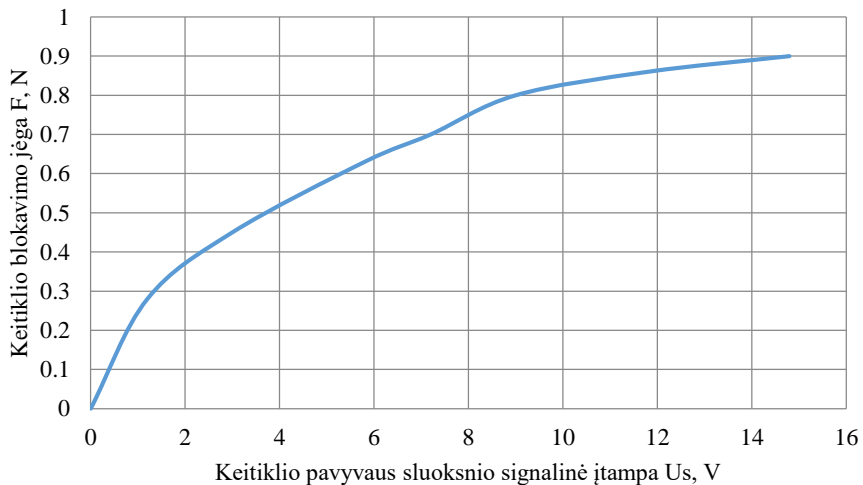
3.27 pav. Magnetoreologinio skysties MRF – 140CG pjezoelektrinio keitiklio atsilenkimų amplitudės priklausomybė nuo signalinės įtamos U_s

Susumavus ir aproksimavus dviejų kreivių 3.27 pav. ir 3.28 paveiksluose pateiktas reikšmes, gaunamas vienas bendras pjezoelektrinio keitiklio jutiklio signalo U_s priklausomybės nuo atsilenkimų amplitudės grafikas, kuris yra vienas iš pagrindinių ir atraminių atliekant tolimesnius tyrimo etapus (3.28 pav.).



3.28 pav. Kraščių klampumų MRS atstojamasis grafikas

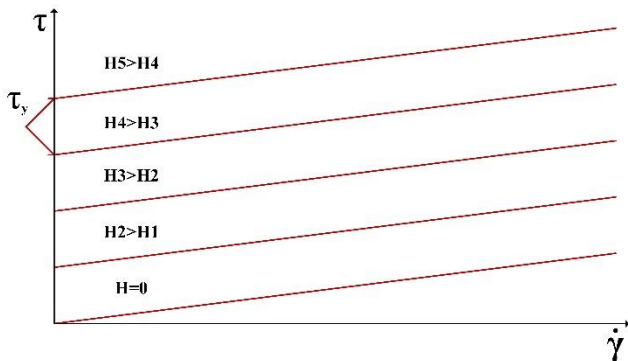
Antrasis labai svarbus priklausomybių atraminis grafikas buvo gautas eksperimentinio tyrimo metu, kai jėgos matavimo prietaisu MARK – 10 BGI buvo išmatuota pjezoelektrinio keitiklio blokavimo jėga prie atitinkamų signalinių neaktyvaus pjezoelemento reikšmių ir gauta priklausomybių kreivė 3.29 pav.



3.29 pav. Pjezoelektrinio keitiklio blokavimo jėgos priklausomybė nuo signalinės įtampos U_s

Atlikus matavimą tam tikromis sąlygomis, pvz., kai pasirenkamas tam tikras tiriamasis skystis, tam tikra valdymo įtampa U_j (V) – gaunamas rezultatas: tam tikro dydžio signalinė įtampa U_s (V). Žinant šios įtampos dydį iš anksčiau aptartų atraminių priklausomybių, gaunama amplitudės A (μm) reikšmė bei tam tikros jėgos F (N) reikšmė.

Remiantis *Bingham* modeliu [86]:



3.30 pav. *Bingham* modelis

bei jo matematinės išraiškos formuluote [86]:

$$\tau = \tau_y + 2S\eta\dot{\gamma}, \quad (3.12)$$

kur, τ – šlyties įtempimai; τ_y – takumo ribos įtempimai; $2S$ – efektyvus kontaktuojančio elemento plotas iš abiejų pusių; $\dot{\gamma}$ – šlyties kitimo greitis.

Turint amplitudės A bei blokavimo jėgos F reikšmes, apskaičiuojamas šlyties kitimo kiekis (arba kitaip greitis) [86]:

$$\dot{\gamma} = \frac{A \cdot 2\pi f}{h} \quad (3.13)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 0,13}{1,55} = 5,26 \text{ (s}^{-1}\text{)},$$

kur f – dažnis; h – atstumas tarp dviejų plokštumų: indo sienelės ir kontaktuojančio elemento.

Toliau atliekamas šlyties takumo ribos įtempimų skaičiavimas [86]:

$$\frac{F}{2S} = \tau_y, \quad (3.14)$$

ir magnetoreologinio skysčio dinaminio klampumo skaičiavimas [86]:

$$\eta = \frac{\tau - \tau_y}{\dot{\gamma}}. \quad (3.15)$$

3.5 Skyriaus apibendrinimas

Atlikus teorinius skaičiavimus ir eksperimentinius bandymus gautas magnetinės indukcijos dydis $B=0,95$ T. Tai yra labai artimas rezultatas nurodytam teorinėje literatūroje. Kai magnetinė indukcija yra reikiamo dydžio, magnetoreologinio skysčio klampumas gali būti keičiamas nuo savojo pradinio iki galimai maksimalaus. Tai patvirtina analitinio, skaičiuojamojo, modeliuojamojo bei eksperimentinio tyrimo teisingumą: $B_{\text{analitinis}}=1\text{T} \sim B_{\text{skaičiuojamas}}=0.942\text{T} \sim B_{\text{comsol modeliuotas}}=1.15\text{T} \sim B_{\text{eksperimentinis}}=0.95\text{T}$.

Iš gautų eksperimentinių rezultatų sudarytas kraštinių klampumų magnetoreologinių skyčių (MRF – 12ED ir MRF – 140CG) atstojamasis grafikas. Remiantis jo duomenimis, atlikus nežinomo klampumo MRS eksperimentinį tyrimą, galima nuskaityti MRS klampumo duomenis šiame grafike.

Taip pat buvo ištirtos pjezoelektrinio keitiklio blokavimo jėgos ribos esant skirtingam MRS klampumui. Blokavimo jėgos kitimo ribos $F_{bl}=0.9$ N, kai signalinė pasyvaus pjezoelektrinio keitiklio įtampa $U_s=15$ V.

Sukurtas ir eksperimentiškai patikrintas magnetoreologinio skysčio dinaminio klampumo tyrimo metodas.

Šiame skyriuje yra siūloma nauja tyrimo sistema, kuri pasižymi maža kaina ir kompaktiška sudėtimi bei galimybe lokaliai nustatyti magnetoreologinio skysčio reologines savybes.

4. PJEZOELEKTRINĖS DIAGNOSTINĖS SISTEMOS, REOLOGINIŲ SKYSČIŲ ILGALAIKIAM STABILUMUI PALAIKYTI, SUKŪRIMAS

4.1 Reologinių skysčių stabilumo tyrimas

Sedimentacija – vienas pagrindinių ir neigiamų kriterijų, sąlygojančių ER ir MR skysčių tyrinėjimą bei praktinio pritaikymo galimybes. Tai yra skystyje esančių dalelių nusėdimas, kai skystis nėra veikiamas magnetiniu ar elektriniu lauku. Paprastai sedimentacijos procesas trunka nuo kelių iki keliolikos dienų. Reologinio skysčio efektyvumą lemia sedimentacijos reiškinio dydis. Sedimentacijos problemai spręsti yra imamas įvairiausių būdų. Būdo pasirinkimas priklauso nuo konkrečios situacijos. Sedimentacijos proceso išvengimas gali būti sprendžiamas skysčio gamybos metu, įrenginio, kuriame skystis naudojamas kūrimo procese ar netgi paskutinio etapo metu, jau pagaminto įrenginio veikimo procese. Anksčiau minėti metodai sprendžiami: mažinant parenkamų magnetinių ar elektrinių dalelių skersmenį, parenkant didesnio tankio nešančiuosius skysčius. Feromagnetinių ar elektriškai jautrių dalelių sėdimas į indo dugną yra gravitacinės jėgos veikimo rezultatas, todėl nusėdimo greitis yra tiesiogiai proporcingas dalelės diametru, t. y. didėjant dalelių diametru auga tikimybė, lemianti sedimentacijos dydį [87].

Sedimentacijos greitis priklauso nuo įvairių parametru:

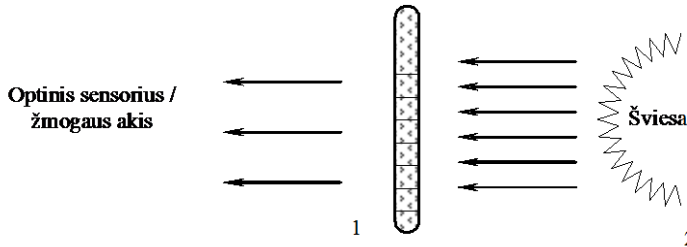
- ERS ar MRS pagrindui (bazei) naudojamo skysčio tankio ir klampumo;
- feromagnetinių dalelių dydžio;
- feromagnetinių dalelių koncentracijos skystyje;
- feromagnetinių dalelių ir skysčio molekulių sąveikos;
- skysčio temperatūros;
- skysčio temperatūros kitimo intervalo ir greičio;
- veikimo intervalų;
- indo, kuriame yra ERS ar MRS, konfigūracijos
- ERS ar MRS apkrovos „darbo“ metu.

Norint įsitikinti ar skystis stabilus ir kiek laiko jis tinkamas naudoti buvo atlikti tam tikri bandymai, kurių metu nustatomos reikiamos skysčio charakteristikos.

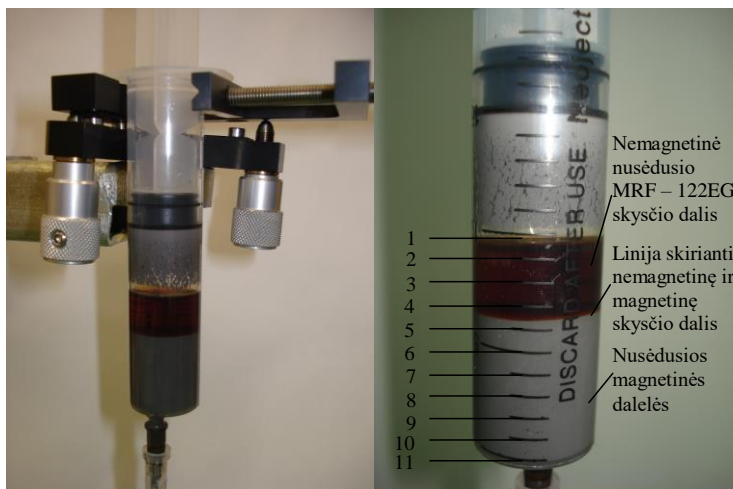
Eksperimentai buvo atlikti panaudojant *Lord* kompanijos magnetoreologinius skysčius: MRF-140CG ir MRF-122EG.

Šių skysčių sandėliavimo charakteristikos: turi būti laikomi siauruose specialiuose induose, kurie yra sandarūs. Skysčių neturi veikti atmosfera. Jei bus pažeistos skysčio laikymo sąlygos ir skystis reaguos su aplinka, gali įvykti cheminė reakcija, t. y. gali atsiskirti dalelės. Specialiai tokiems atvejams yra naudojami įvairūs maišytuvai skysčiui išmaišyti. Tam tikras atsiskyrimo laipsnis gali atsirasti ir esant statinėms sąlygoms, tačiau juos iš naujo permaišius ar sukračius prieš naudojimą, dalelytės grįš į homogeninę būseną. Vienas iš skysčio maišymo būdų, prieš pradėdant jį naudoti reikiamose konstrukcijose, yra vibracinis dažų maišymo stendas. Tiriamasis atvejis yra specifinis ir reikalaujantis specialiųjų maišymo būdų. Pradžiai buvo nustatytas sedimentacijos greitis stebint vizualiai. Toks būdas yra paprasčiausias, tačiau paminėtina tai, kad ir netiksliausias. Vizualusis būdas tinka tik tada, kai skystis

nėra kokioje nors konkrečioje konstrukcijoje. Jis naudingas tik skysčio, kuris vėliau bus naudojamas kokioje nors konstrukcijoje sedimentacijai prognozuoti. Vizualus stebėjimas buvo atliktas naudojant šiuos MR skysčius: MRF – 122EG (*Lord Corporation, JAV*) bei MRF-140CG (*Lord Corporation, JAV*).



4.1 pav. Stebėjimo schema: 1 – mėgintuvėlis su MR skysčiu; 2 – šviesos šaltinis



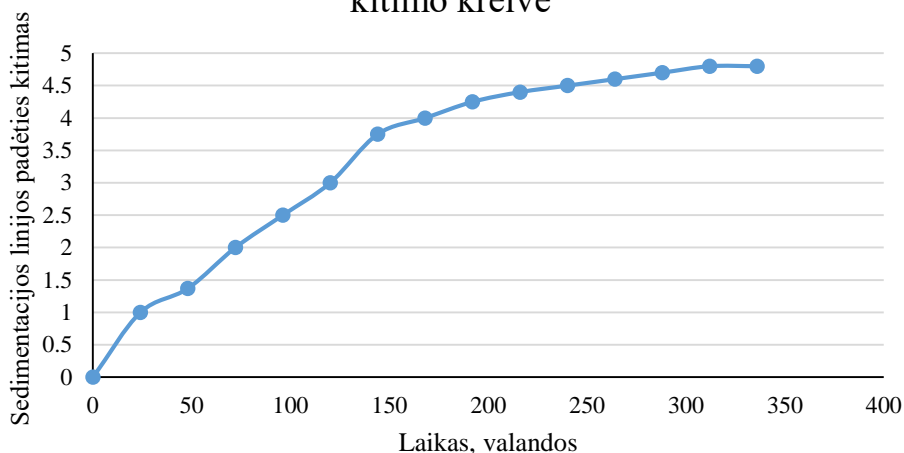
4.2 pav. Sedimentacijos reiškinio tyrimo eksperimentinis stendas

Atlikus vizualinio stebėjimo eksperimentą buvo nustatyta, kad magnetoreologinis skystis MRF – 122EG visiškai nusėda per 14 dienų. Eksperimentinis „švirkštas“ buvo padalintas į 11 padalų ir kasdien buvo registruojama linijos padėtis, skirianti magnetinę bei nemagnetinę skysčio dalis.

4.3 pav. vaizduojamoje kreivėje sedimentacijos linijos padėties kitimas – tai linija, kurios padėtis kinta laikui bėgant. Ši linija yra riba tarp nemagnetinės dalies ir magnetinės skysčio dalies. Prieš išbandant sukurtas reologinio skysčio maišykles, magnetoreologinis skystis bandymams buvo ruošiamas dvi savaites. Laikomas buvo statinėje būsenoje tam, kad matytųsi aiški skysčio sedimentacija.

Taip pat buvo išmatuotas induktyvumas skirtinguose skysčio stulpeliuose tam, kad būtų galima patvirtinti vizualinio stebėjimo duomenis. Induktyvinis matavimo būdas lemia magnetinių dalelių koncentraciją skirtinguose stulpelio aukščiuose.

Sedimentacijos reiškinio vizualinio stebėjimo kitimo kreivė



4.3 pav. Sedimentacijos reiškinio kitimo kreivė

Vizualinis stebėjimas nėra tikslus būdas tirti esančiam įrenginyje skysčiui. Dažniausiai jo taikyti negalima. Be to, ir pats įrenginys gali būti sumontuotas tokioje mechanizmo vietoje, kad vizualiai stebėti ne visais atvejais įmanoma. Kuriant magnetoreologinio skysčio stabilumo palaikymo sistemas, vienas iš pagrindinių aspektų, apsunkinančių skysčio maišymą ir monitoringą ir buvo tai, kad mechaninis maišymas ir vizualinis stebėjimas yra tinkami ne visais atvejais. Todėl šiam tikslui buvo kuriamos tobulesnės ir tikslesnės stebėjimo sistemos.

4.2 Magnetoreologinio skysčio maišymas panaudojant daugiafunkcinę elektromagnetinę ritę

Sukurtas matavimo įrenginys yra priskiriamas prietaisų sričiai, kuriuose naudojami magnetoreologiniai skysčiai. Magnetoreologiniai skysčiai susideda iš magnetinių dalelių (geležies ar kobalto), kurios yra sumaišytos su silikonu ar mineraline alyva. Nepaisant visų MR skysčio privalumų, egzistuoja ir trūkumai – atsirandanti ir laipsniškai didėjanti sedimentacija, kuri yra tiesiogiai proporcinga laikui. Šis prietaisas yra priskiriamas matavimo prietaisų sričiai. Konkreti, sedimentacijos matavimo konstrukcija susideda iš skaidraus vamzdelio, kuriame yra magnetoreologinis skystis bei indukcinės ritės. Šios konstrukcijos pagrindinė paskirtis – pamatuoti magnetinę indukciją skirtinguose stulpelio aukščiuose. Magnetinės indukcijos matavimo principu galima nustatyti nevienodą geležies dalelių koncentraciją skirtinguose stulpelio aukščiuose, nes magnetinė indukcija yra tiesiogiai susieta su magnetinės skvarbos konstanta [88]:

$$L = n^2 \cdot G \cdot \mu, \quad (4.1)$$

kur n – apvijos vijų skaičius, G – geometrinės formos koeficientas, μ – magnetinė skvarba.

Induktyvumas priklauso nuo laidininko matmenų ir formos, taip pat ir aplinkos, kurioje yra laidininkas magnetinių savybių [88]:

$$L = \frac{\phi}{I}, \quad (4.2)$$

kur L – induktyvumas (H); ϕ – magnetinis srautas (Wb); I – laidininku tiekama elektros srovė (A).

Tekėdama laidininku elektros srovė sukuria aplink jį magnetinį lauką. Jo induktyvumo modulis B yra proporcingas srovės stipriui. Kadangi magnetinis srautas Φ yra proporcingas magnetinės indukcijos moduliui B , tai [88]:

$$\Phi = LI. \quad (4.3)$$

Koeficientas L vadinamas kontūro induktyvumu, kuris priklauso nuo kontūro matmenų, formos, nuo aplinkos magnetinių savybių.

Be to, egzistuoja labai glaudus ryšys tarp dydžių: $\phi \approx B \approx I$.

Reikia paminėti, kad dar induktyvumas gali būti išreiškiamas tokia matematine priklausomybe [88]:

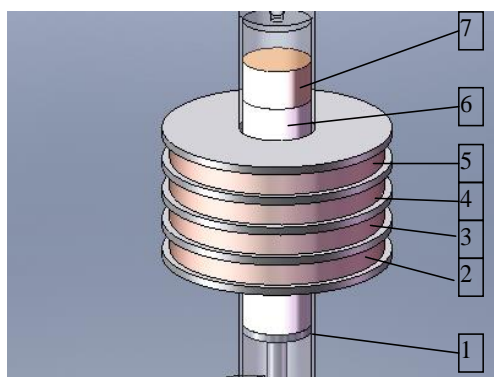
$$L = \frac{N^2 A \mu_0}{l} \mu_T, \quad (4.4)$$

kur N – ritės vijų skaičius, A – vijos skerspjūvio plotas, l – ritės ilgis, μ_0 – magnetinio pralaidumo skvarba vakuume, μ_T – santykinė magnetinė skvarba MRF skystyje.

Magnetoreologinio skysčio geležies dalelių nusėdimo dydis gali būti santykinai išreikštas tokia matematine priklausomybe [88]:

$$R = \frac{a}{a + b} \cdot 100\%, \quad (4.5)$$

kur R – sedimentacijos procentinis dydis, a – skaidraus skysčio stulpelio ilgis, esantis virš „mudline“ linijos, b – stulpelio ilgis esantis žemiau „mudline“ linijos.



4.4 pav. Magnetoreologinio skysčio sedimentacijos matavimo projektinis vaizdas

Tiriamasis objektas magnetoreologinis skystis MRF – 140CG buvo supiltas į 2 ml talpos švirkštą ir stebimas statinėje būklėje 336 valandas.



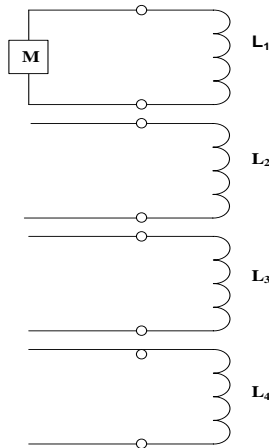
4.5 pav. Magnetoreologinis skystis MRF – 140CG. Sedimentacijos trukmė 336 valandas

4.5 paveiksle aiškiai matyti atsiskyrusi nemagnetinė skysčio dalis (alyva). Prieš atliekant tyrimą *Solid works* programiniu paketu buvo sumodeliuotas eksperimentinis stendas, kuris vaizduojamas 4.4 paveiksle. Stendą sudaro: nedidelis skaidrus vamzdelis, MRS ir 4 indukcinės ritės. Šių ričių induktyvumas buvo matuojamas ore ir paskui suvienodintas.

4.1 lentelė. Sedimentacijos matavimo schemas dalių aprašymas

Nr.	Aprašymas
1	Skaidrus vamzdelis, kuriame yra supiltas magnetoreologinis skystis
2	Ritė L ₄
3	Ritė L ₃
4	Ritė L ₂
5	Ritė L ₁
6	Skaidri, nusėdusios skysčio dalis (alyva)
7	Magnetoreologinis skystis su atitinkama geležies dalelių koncentracija atskiruose stulpelio lygmenyse

Matavimams atlikti buvo naudojamas multimetras: „MASTECH – MS8222H“. Matavimo metu ritės buvo užmautos ant skaidraus vamzdelio, kuris buvo pripildytas MR skysčiu. Indukcinė ritės vielos skersmuo 0,223mm; apie 250vijų; $L = 0,679\text{mH}$ ir $R = 3,1 \Omega$.



4.6 pav. Indukcinės ritės elektrinės grandinės principinė schema: M – multimetras ir keturios ritės, kurių induktyvumas ore yra vienodas: L_1 , L_2 , L_3 , L_4

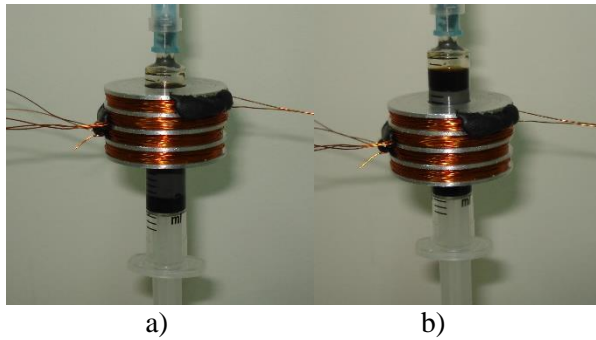
Tyrimo metu svarbus parametras yra μ - magnetinė skvarba, nes nuo jos pokyčio skirtinguose stulpelio lygmenyse priklauso ir induktyvumo dydis. Šio darbo uždavinys – pamatuoti induktyvumą ore ir skirtinguose stulpelio lygiuose. Lyginant rezultatus galima nustatyti dalelių koncentraciją skirtinguose stulpelio aukščiuose. Aiškiausiai pastebimas rezultatas yra kraštiniuose stulpelio taškuose. Kritinių taškų pamatavimas yra pats aiškiausias ir greičiausias būdas įvertinti sedimentacijos reiškinį. Tokį įrenginį galima pavadinti induktyviniu jutikliu, kurio pranašumas yra toks, kad jis nėra priklausomas nuo aplinkos dielektrinės skvarbos, tačiau jis yra veikiamas išorinių laukų.

Naudojant induktyvinį magnetoreologinio skysčio nusėdimo matavimo būdą, galimi matavimo variantai:

1. Išmatuojamas kiekvienos ritės induktyvumas L_1 ; L_2 ; L_3 ; L_4 ir įvertinant induktyvumų skirtumą, nustatoma dalelių koncentracija atskiruose, greta esančiuose magnetoreologinio skysčio sluoksniuose.

2. Išmatuojama per visą stulpelio ilgį susidariusių magnetinių dalelių koncentracija, pajungiant induktyvumo matavimui tik vieną iš keturių ričių ir laisvai stumdant per visą stulpelio ilgį norimais atstumais.

Matavimas buvo atliktas abiem būdais, tačiau naudojant pirmąjį būdą, matavimo diapazoną apribojo indukcinė ričių karkaso ilgis (šiuo atveju MR skystis buvo tiriamas tik viršutinėje dalyje). O naudojant vieną indukcinę ritę, suvytą ant aliuminio karkaso, galima iširti MR skysčio dalelių koncentraciją visame užimame tūryje. 4.7 paveiksle pavaizduota kaip keičiama indukcinės ritės padėtis.

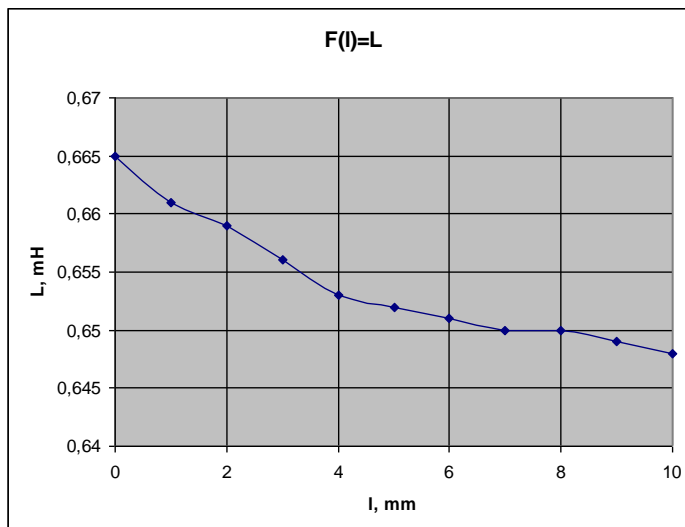


4.7 pav. Indukcinės ritės padėtys: a) viršutinė b) apatinė

Matavimo metu buvo pasirinkta viršutinė indukcinė ritė ir išmatuotas jos induktyvumas ore, po to ritė buvo užmauta ant nedidelio skaidraus vamzdelio su MR skysčiu ir slenkama žemyn po vieną milimetrą.

Indukcinės ritės induktyvumas ore: $L = 0,679$ mH.

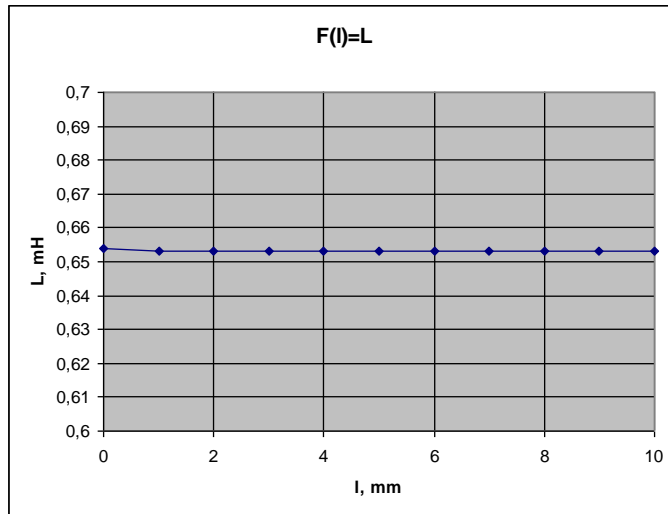
Atlikus MR skysčio dalelių koncentracijos matavimus nustatyta, kad didėjant dalelių koncentracijai, indukcinės ritės induktyvumas mažėja (4.8 pav.). Taip yra todėl, kad aliuminis karkasas yra vientisas ir neperpjautas, todėl jis indukcinėje ritėje sudaro trumpai sujungtą apviją. Didėjant induktyvumui didėja ir kuriama elektrovara trumpai sujungtoje apvijoje. Ji yra priešinga indukcinės ritės elektrovarai. Tai turėjo įtaką matavimo rezultatams. Matavimo rezultatai buvo gauti mažėjantys, o ne didėjantys.



4.8 pav. Ritės padėties priklausomybė nuo induktyvumo, sedimentacijos paveikto MR skysčio

Atlikus sedimentacijos paveikto MR skysčio matavimus, MR skystis buvo išmaišytas ir vėl pakartotinai išmatuotas. Atlikus išmaišyto MR skysčio dalelių koncentracijos matavimus nustatyta, kad visame vamzdelio tūryje indukcinės ritės

induktyvumas beveik nekinta. Induktyvumo matavimas atliktas multimetru, kurio modelis *CHY 24CS LCR Meter*. Induktyvumo matavimo ribos yra nuo 0,02 μH iki 20H, matavimo skyra 0,01 μH , tikslumas 5 %.



4.9 pav. Išmaišyto MR skysčio ritės padėties priklausomybė nuo induktyvumo

Panaudojant indukcinės riteles galima nesunkiai nustatyti MR skysčio būklę. Tačiau kiekvienam įrenginiui su MR skysčiu reikia sukurti vis skirtingą matavimo prietaisą.

Panaudojant elektromagnetinį metodą buvo sukurtas daugiavfunkcinis prietaisas atliekantis funkcijas:

- veikiantis kaip monitoringo sistema, galinti pamatuoti geležies dalelių koncentraciją reikiamoje vietoje;
- veikiantis kaip magnetoreologinio skysčio maišyklė (aprašymas kitame skyrelyje);
- nugalintis gravitacinę jėgą taip pakeldamas dalele nuo indo dugno.
- Skysčio klampumo pasikeitimui.

Patikrinus MR skysčio nusėdusių dalelių koncentracijos matavimo metodą nustatyta, jog jis veikia, o dėl nesudėtingos konstrukcijos gali būti plačiai naudojamas. Tačiau norint kad MR skystis veiktų patikimai ir išlaikytų savo charakteristikas, jį reikia nuolatos permaišyti. Tam buvo sukurtos kelios maišyklės:

- panaudojant keturias indukcinės rities suvyniotas ant plieninė šerdies;
- panaudojant pjezokeramiką;

Atlikus tyrimą elektromagnetiniu būdu išorinėje MRS pusėje, nuspręsta panardinti rities į skystį ir palyginti gautus rezultatus.

4.3 Indukcinė ritė – magnetoreologinio skysčio maišymas magnetiniu lauku

Keturių ritelių konstrukcija yra ypatinga ir unikali tuo, kad ji gali atlikti keletą funkcijų: pamatuoti magnetoreologinio skysčio induktyvumą atskirose ritelėse imant keturių ričių aukštį; veikiant tik vienai ritei išmatuoti magnetoreologinio skysčio atskirų dalių visame stulpelio aukštyje induktyvumą; veikti kaip maišyklė.

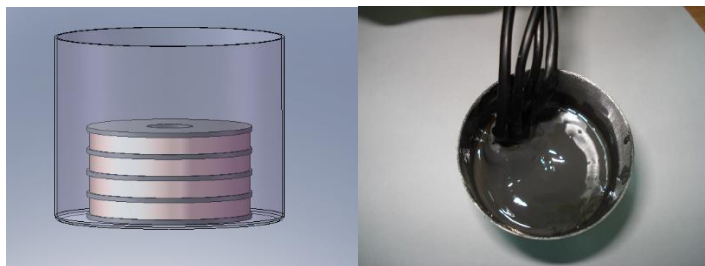
Ši konstrukcija veiks kaip maišyklė, kai bus išpildyta tokia sąlyga:

$$I_4 < I_3 < I_2 < I_1.$$

Šios sąlygos esmė – kiekvienoje atskiroje ritėje yra kuriama skirtingo dydžio elektros srovė, ritelėje aplink save sukurianti magnetinį lauką. Dėl skirtingo stiprio, magnetinio lauko ritelėje susidaro bėgantis magnetinis laukas, kuris nuo indo dugno pakelia magnetines geležies daleles į viršų, taip išmaišydamas skystį.

Tokia pati ritelė gali veikti skystį ne tik indo išorėje, bet ir panardinta į skystį. Tokio matavimo metodo eksperimentinį standą sudaro indas su MR skysčiu ir viduje jo panardinta indukcinė rite suvyta ant keturių metalinių karkasų, kuri yra centruota indo dugne (4.10 pav.).

Indukcinės ritės vielos skersmuo 0,223 mm; apie 270 vijų; $L = 8,59$ mH ir $R = 6,3\Omega$.

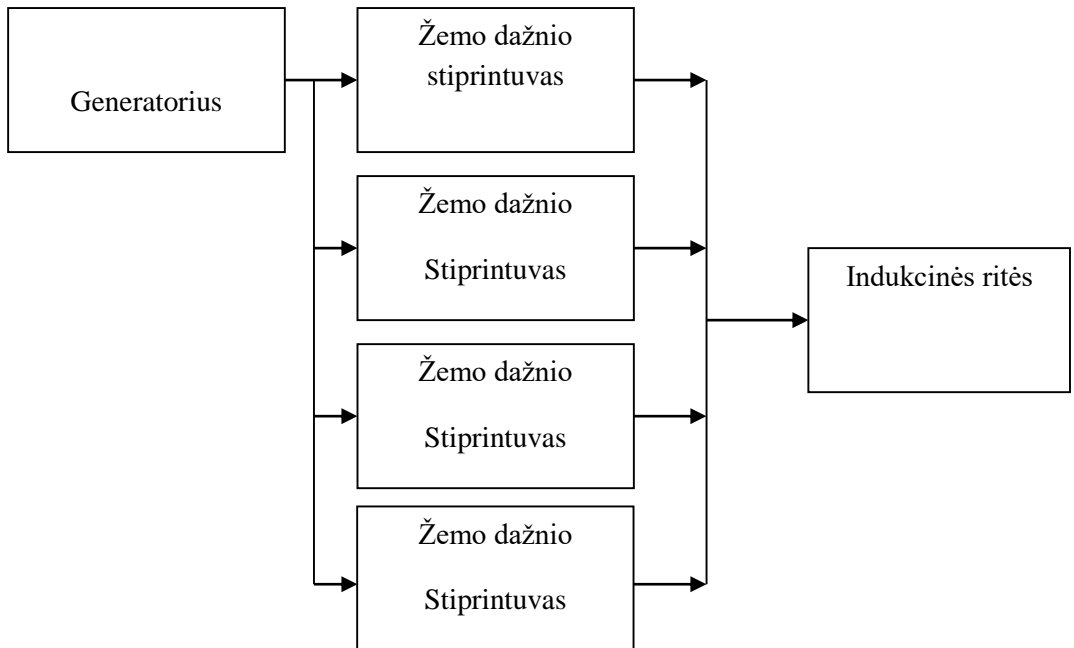


4.10 pav. Indukcinė ritė panardinta MR skystyje

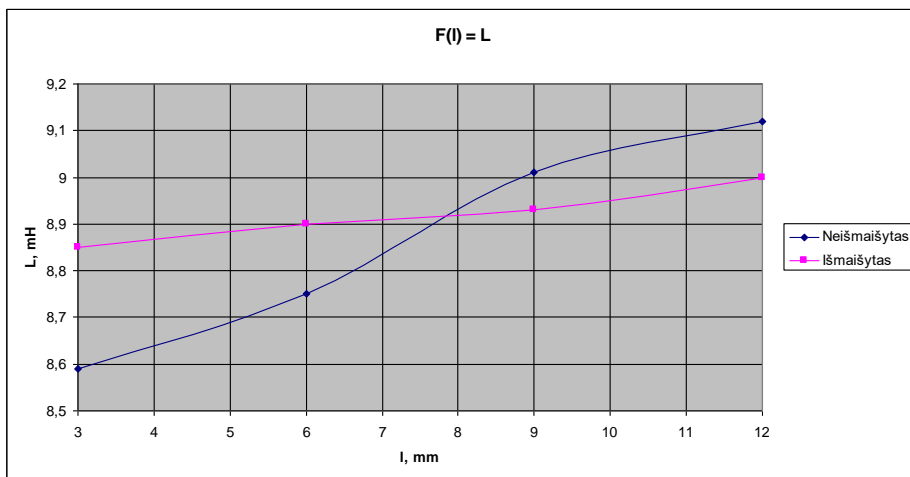
Kad šios ritės veiktų maišyklės principu, reikėjo sukurti bėgantį magnetinį lauką, kuris keltų nusėdusias MR skysčio daleles iš indo dugno į indo viršų.

Keturių kanalų generatoriumi buvo sukurtas bėgantis magnetinis laukas, kuris veikė MR skysčio daleles ir jas kėlė iš indo dugno į indo viršų.

Tyrimo metu buvo nustatyta, jog sedimentacijos paveiktas MR skystis geriausiai maišosi, kai jį veikia 20 – 30Hz dažnio bėgantis magnetinis laukas. Ši išvada buvo padaryta įvertinus keletą eksperimentinių tyrimų. Be to, palikus įmagnetintą plieninę šerdį karkaso viršutinėje dalyje, MR skysčio dalelės nusėda per ilgesnį laiko tarpą neįprastoje talpoje. Įprastoje talpoje skystis visiškai išs sluoksniuoją per 14 dienų. Kitu atveju laikas pailgėja. Kitaip tariant, tokiu būdu sedimentacijos procesas sulėtėja. 4.11 paveiksle pateikiama indukcinų ričių tyrimo eksperimentinė blokinė schema.



4.11 pav. MR skysčio maišymas panaardintomis keturiomis indukcinėmis ritėmis – blokinė schema



4.12 pav. MR skysčio geležies dalelių indo tūryje koncentracijos matavimo rezultatai

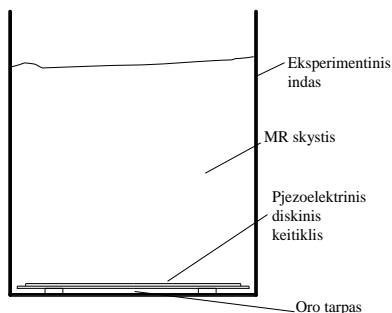
MR skystyje panaardintos indukcinės ritės, nusėdusias daleles veikė magnetiniu lauku, ir kėlė jas iš indo dugno į indo viršų. Iš gautų rezultatų matyti, kad MR skystis išsimaišė, bet MR skysčio dalelių koncentracija indo dugne ir indo viršuje buvo skirtinga (4.12 pav.).

Atlikus eksperimentinius tyrimus su elektromagnetine rite, toliau tyrimams atlikti bus panaudotas ultragarsinis tyrimas.

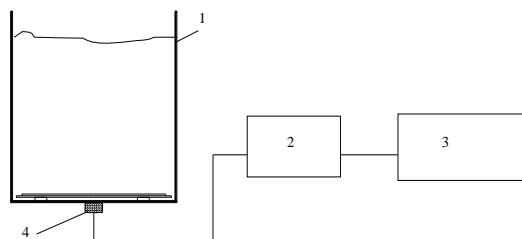
4.4 Magnetoreologinio skysčio maišymas panaudojant pjezoelektrines medžiagas

ULTRAGARSAS – tai aukštesnis nei 20 kHz aukšto dažnio garsas. Ultragarso dažnio viršutinę ribą lemia medžiagos sandara: dujų elastinių bangų ilgis didesnis už molekulių laisvojo kelio ilgį, o skysčių ir kietųjų kūnų – už nuotolį tarp atomų. Ultragarso dažnių diapazonas skirstomas į tris sritis: $<10^4$ Hz – žemo, 10^4 – 10^6 Hz – vidutinio ir 10^6 – 10^8 Hz – aukšto dažnio ultragarsą (elastinės bangos, kurių dažnis $>10^8$ Hz, vadinamos hypergarsu). Dujose ir skysčiuose gali sklirti tik išilginės, kietuosiuose kūnuose – išilginės ir skersinės elastinės bangos. Ultragarso sklidimo kryptis tiriama geometrinės akustikos metodais. Ultragarsas nuo didelių aplinkos nevienalytiškumų atsispindi ir lūžta. Ultragarsą galima fokusuoti akustiniais lęšiais ir reflektoriais. Jo sklidimo greitis priklauso nuo medžiagos tamprumo ir tankio; kai kuriose medžiagose jis priklauso ir nuo bangų dažnio – pasireiškia ultragarso greičio dispersija. Ultragarsas slopsta greičiau nei žemesnio dažnio bangos.

Naudojant pjezoelektrines medžiagas (pjezoelektrinis diskinis keitiklis, ultragarsą skleidžiantis pjezoelektrinis žiedas) eksperimentiškai buvo ištirtos dvi magnetoreologinio skysčio maišyklės: 1. Panaudojant diskinių pjezoelektrinių keitiklių panardintą magnetoreologiniame skystyje, kai keitiklis tvirtinamas tiriamojo eksperimentinio indo vidinėje dalyje. 2. Pjezoelektriniai žiedai tvirtinami išorėje tiriamojo indo.

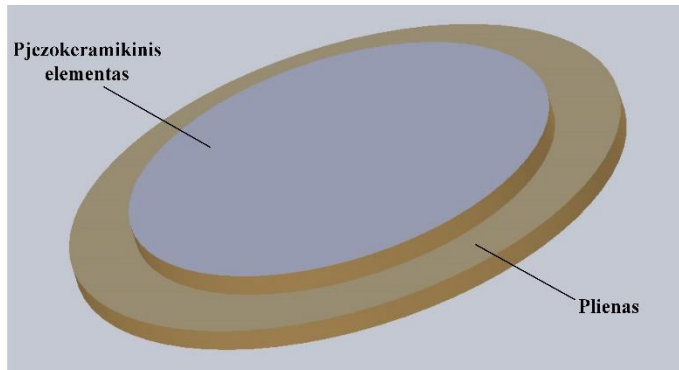


4.13 pav. Magnetoreologinio skysčio ultragarsinio maišytuvo schema.

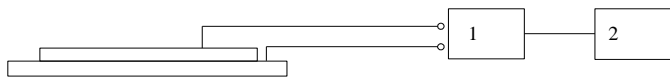


4.14 pav. 1 – eksperimentinis indas; 2 – signalo stiprintuvas; 3 – osciloskopas, signalo formai ir virpesių amplitudei pamatuoti; 4 – vibrodaviklis KD91

Pirmoji konstrukcija, kuri buvo sukurta maišyti yra dvifunkcė, nes ja galima maišyti ne tik labai mažus reologinio skysčio tūrius, bet ir nustatyti ultragarso virpėjimo slopinimą esant tam tikram skysčio klampumui bei tūriui (4.13 ir 4.14 pav.).



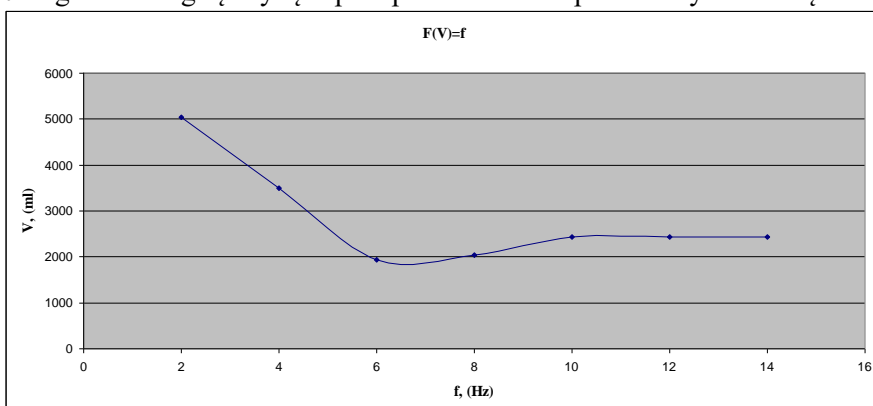
a)



b)

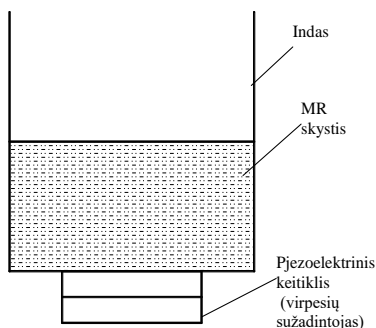
4.15 pav. Pjzoelektrinis diskinis keitiklis: a) ultragarsinio elemento sandara b) jungimo schema: 1- stiprintuvas; 2- generatorius

Atliekant eksperimentą, buvo matuojamas rezonansinis dažnis ir jo kaita į indą pilant magnetoreologinį skystį ir palaipsniui didinant pilamo skysčio kiekį.

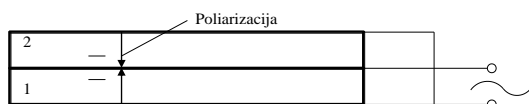


4.16 pav. Žadinimo virpesių dažnio priklausomybė nuo MR skysčio tūrio.

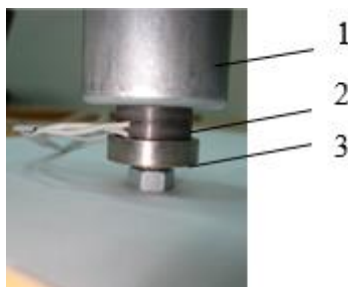
Stebima rezonansinio dažnio priklausomybė nuo magnetoreologinio skysčio tūrio. Eksperimento rezultatai pateikiami 4.16 paveiksle.



4.17 pav. Eksperimentinis stendas. Ultragaršą skleidžiantis elementas pritvirtintas tiriamojo indo išorėje.



4.18 pav. Pjezoelektrinis keitiklis, kuris susideda iš dviejų pjezoelektrinių žiedų (1,2) ir yra sujungtas pagal Lanževano schemą.



4.19 pav. Eksperimentinis stendas: 1 – indas su tiramuoju MRS; 2 – pjezoelektriniai žiedai sujungti pagal Lanževano schemą; 3 – atraminė masė

Atlikus šį eksperimentą paaiškėjo, kad tokia konstrukcija maišymui yra tik iš dalies tinkama. Kai MR skysčio tūriai maži, maišymas vyksta, tačiau padidinus MR skysčio kiekį, ultragarsinio elemento virpėjimas nuslopsta. Taigi galima teigti, kad tokia maišyklė būtų tinkamesnė mažesnio klampumo medžiagoms arba labai mažiems MR skysčio tūriams maišyti.

Tobulinant ultragarsinės maišyklės konstrukciją buvo išmėgintas ir kitoks būdas – ultragarsinį virpinimo elementą pritvirtinant išorinėje indo pusėje. Ultragarsinis elementas buvo pasirinktas kitokių geometrinių formų ir sujungtas pagal „Lanževano“ schemą.

Atliekant bandymus pagal šią eksperimentinę schemą buvo prieita prie išvados, kad medžiaga yra šiek tiek per klampi, kad būtų tinkama maišyti didesniais kiekiais. Taigi tokia sistema puikiai tinka maišyti mažiems reologinio skysčio tūriams.

4.5 Skyriaus apibendrinimas

Atlikti išsamūs eksperimentiniai tyrimai naudojant sukurtas stabilumo palaikymo bei diagnostines sistemas. Sukurta magnetoreologinių skysčių stabilumo palaikymo sistema, efektingai palaikanti skysčių homogeniškumą.

Atlikti magnetoreologinių skysčių monitoringo sistemos tyrimai ir patvirtinti teiginiai, kad ramybės būsenoje magnetoreologinis skystis visiškai nusėda per 336 valandas.

Panaudojant elektromagnetinį ir ultragarsinį metodus sukurta keletas skysčio stabilumo palaikymo metodų. Pritaikant išorinio ir vidinio matavimo principus bei panaudojant elektromagnetinį metodą buvo sukurtas daugiafunkcinis prietaisas.

Suformuluoti pagrindiniai reikalavimai kiekvienai iš sukurtų stabilumo palaikymo sistemų.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Atlikus išsamią magnetoreologinių skysčių analizę bei reologinių parametrų matavimo prietaiso analizę nustatyta, kad reologinių savybių tyrimas yra atliekamas brangiais ir sudėtingos konstrukcijos reometrais, kurie dažnu atveju siekia nepakankamo dydžio magnetinę indukciją, iki $B=0,3$ T. Dėl šios priežasties kuriamas mobilus, mažos konstrukcijos ir lokaliai galintis matuoti magnetoreologinių skysčių reologinių parametrų nustatymą įrenginys, kuriame panaudoti pjezoelektriniai keitikliai, veikiantys tiesioginiu ir atvirkštiniu pjezoelektriniu efektu.
2. Tiriamojo magnetoreologinio skysčio reologinių parametrų keitimui suprojektuotas ir pagamintas specialios formos elektromagnetas, kuriam *Comsol Multiphysics 4.4* paketu buvo atliktas skaitinis modeliavimas. Parinkti elektromagneto geometriniai matmenys ir elektromagnetiniai parametrai leidžia bandomąjį 0.4 ml tūrio magnetoreologinį skystį paveikti magnetiniu lauku, kurio magnetinės indukcijos tankis gali būti keičiamas nuo 0 iki 1,2T.
3. *Comsol Multiphysics 4.4* paketu atliktas gėmiškai įtvirtinto pjezoelektrinio bimorfo, kurio laisvasis galas apkrautas tiriamojo skysčio klampumo jėga: skaitinis modeliavimas, nustatytos parinkto pjezoelektrinio keitiklio dinaminės charakteristikos, gautos sužadintų poslinkių nuo veikiančių jėgų priklausomybės bei pjezoelektrinio keitiklio sugeneruoto elektrinio signalo priklausomybė nuo jo laisvąjį galą veikiančios jėgos. Jėginio ir signalinio sluoksnio įtampų santykis kinta nuo 6.6 iki 22 kartų, priklausomai nuo magnetoreologinio skysčio klampumo.
4. Remiantis modeliavimo rezultatais sukurtas magnetoreologinių skysčių reologinių parametrų matavimo eksperimentinis standas, kuriame panaudotas firmos Noliac A/S bimorfinis pjezokeitiklis, veikiantis vienu metu tiesioginiu ir atvirkštinio pjezoelektrinio būdu. Šiuo standu buvo iširti firmos *Lord Inc.* dviejų tipų magnetoreologiniai skysčiai (MRF – 122ED ir MRF – 140 CG), turintys skirtingą reologiją. Sukurta eksperimentinių tyrimų metodika leido pagal pjezokeitiklio generuojamo elektrinio signalo dydį nustatyti bandomojo MRS tokius reologinius parametrus, kaip takumo riba – τ_y ir dinaminis klampumas η . Apskaičiuotas šlyties kitimo greitis $\dot{\gamma}=5.26$ (s^{-1}). Elektromagneto pasiekiamas maksimalus magnetinės indukcijos tankis bandomojo MRS zonoje yra keičiamas 0T iki 0,98T. Atliktas bendras sistemos testavimas ir reologinių savybių tyrimas panaudojant lazerinį poslinkių ir tenzometrinių jėgos matavimo prietaisus. Šis tyrimo būdas yra tinkamas norint gauti greitą informaciją apie tiriamojo skysčio reologines savybes. Tyrimo trukmė iki 30 min.
5. Sukurti magnetoreologinių skysčių sedimentacijos monitoringo bei stabilumo palaikymo prietaisai panaudojant ultragarsinius keitikius ir induktyvumo matavimo prietaisą su specialiu zonu. Eksperimentiškai nustatyta, kad sedimentacijos reiškinys magnetoreologiniame skystyje įvyksta per 336 valandas. Induktyvumo matavimo ir stabilumo palaikymo prietaisai tinkamas

gauti greitą tyrimo informaciją ir nuolatiniam sedimentacijos reiškiniui stebėti.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Mark R. Jolly ; Jonathan W. Bender ; J. David Carlson. Properties and applications of commercial magnetorheological fluids.
2. Osama Ashour, Craig A. Rogers. Magnetorheological Fluids: Materials, Characterization, and Devices. 2014 Journal Citation Reports® (Thomson Reuters, 2015).
3. Zi-Fong Yeh, Yan-Shin Shih. Dynamic Characteristics and Dynamic Instability of Magnetorheological Material-based Adaptive Beams. Source:2014 Journal Citation Reports® (Thomson Reuters, 2015)
4. E. P. Scilingo, N. Sgambelluri ; D. De Rossi ; A. Bicchi. Haptic displays based on magnetorheological fluids: design, realization and psychophysical validation. Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2003. HAPTICS 2003. Proceedings. 11th Symposium on.
5. G. Bossisa, S. Lacisb, A. Meuniera, O. Volkova. Magnetorheological fluids. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. Volume 252, November 2002, Pages 224–228. Proceedings of the 9th International Conference on Magnetic Fluids
6. Juan de Vicente, Daniel J. Klingenbergb and Roque Hidalgo-Alvarez . Magnetorheological fluids: a review. Soft Matter, 2011,7, 3701-3710.DOI: 10.1039/C0SM01221A.Received 28 Oct 2010, Accepted 13 Dec 2010. First published online 14 Feb 2011.
7. Young-Tai Choi, Lei Xie and Norman M Wereley. Testing and analysis of magnetorheological fluid sedimentation in a column using a vertical axis inductance monitoring system. Published 29 February 2016 • © 2016 IOP Publishing Ltd.Smart Materials and Structures, Volume 25, Number 4
8. X. Tang, X. Zhang, R. Tao1, Yiming Rong. Structure-enhanced yield stress of magnetorheological fluids. Journal of applied physics. J. Appl. Phys. 87, 2634 (2000).
9. Sahin, H., Liu, Y., Wang, X., Gordaninejad, F., Evrensel, C., Fuchs, A. Full-Scale Magnetorheological Fluid Dampers for Heavy Vehicle Rollover. – Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2007, V. 18, p. 1161 – 1167.
10. Kordonski, W., Golini, D. Multiple Application of Magnetorheological Effect in High Precision Finishing. – Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2002, V. 13, p. 401 – 404.
11. Seval Genç and Pradeep P Phulé. Rheological properties of magnetorheological fluids. Smart Materials and Structures. Published 6 February 2002. Smart Materials and Structures, Volume 11, Number 1
12. D. Crespí-Llorensa, P. Vicentea, A. Viedmab. Flow pattern of non-Newtonian fluids in reciprocating scraped surface heat exchangers. Experimental Thermal and Fluid Science. Volume 76, September 2016, Pages 306–323.
13. Izwan Ismail, Saiful Amri Mazlan, Syarifah Nur Aqida, A.G. Olabi. Full Factorial Design to Study Material Parameters of Magnetorheological Fluid. Key Engineering Materials (Volume 543) . Materials and Applications for Sensors and Transducers II. Pages 511-514.
14. Mounir Aytouna, Jose Paredes, Noushine Shahidzadeh-Bonn, Sébastien Moulinet, Christian Wagner, Yacine Amarouchene, Jens Eggers, and Daniel Bonn. Drop Formation

- in Non-Newtonian Fluids. PHYSICAL REVIEW LETTERS. Phys. Rev. Lett. 110, 034501 – Published 14 January 2013
15. Malcolm M. Cross. Rheology of non-Newtonian fluids: A new flow equation for pseudoplastic systems. Journal of Colloid Science Volume 20, Issue 5, June 1965, Pages 417-437
 16. Medvedeva, E. V. The Influence of Ferromagnetic Particles Coating on Rheological Properties of Magneto-rheological Fluids (MERFs) – International Journal of Modern Physics B, 2005, V. 19, No. 7 – 9, p. 1402 – 1408.
 17. Lord Corporation, USA, MR Damper (RD-1005-3). Prieiga per internetą <http://www.lordmrstore.com/lord-mr-products/rd-8041-1-mr-damper-long-stroke>
 18. Lord Corporation, USA, Magneto-Rheological (MR) Fluids. Prieiga per internetą <http://www.lord.com/Default.aspx?tabid=762 &pid=3>
 19. Lord Corporation, USA, MR Controllable Friction Damper, <http://www.lord.com/Default.aspx?tabid=763 &pid=3>
 20. Lord Corporation, USA, LORD Rheonetic. Magnetically Responsive Technology MR Fluid Comparison Sheet http://literature.lord.com/root/other/rheonetic/fluid_comparison_chart.pdf
 21. R. Tao. Super-strong magnetorheological fluids. Journal of Physics: Condensed Matter. Journal of Physics: Condensed Matter. Published 30 November 2001 .
 22. S. J. Dyked, B. F. Spencer, M. K. Sain, J. D. Carlson. Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction. Smart Materials and Structures, Volume 5, Number 5. 1996 y.
 23. Журавский Н. А., Городкин С. Р. Повышение касательных напряжений сдвига магнитореологических суспензий // Новые «интеллектуальные» материалы электро- и магниточувствительные жидкости и их применение для энергоэффективных технологий (Материалы Международной конференции и школы-семинара, Минск, 11 – 13 сентября 2001 г.). – Минск, УП «Технопринт», 2001. – С. 200 – 206.
 24. Журавский Н. А., Полесский Д. Э., Прохоров И. В. Управляемая магнитным полем реодинамическая прецизионная обработка поверхности // Инженерно-физический журнал. – 2002. – Том 75, №2. – С. 99 – 103.
 25. Novikova Z. A., Matsepuro A. D., Zhuravskii N. A. Stabilization of Aqueous Magnetorheological Fluids // Conference Programme and Books of Abstracts of XIIIth International Conference "Surface Forces" (Moscow, Russia, June 28 – July 4, 2006). – Moscow, 2006. – P. 76.
 26. Korobko E. V., Zhuravskii M. A., Bedzik N. A., Novikova Z. A., Basinuk V. L., Sushko M. I. Tribological Aspects of Electrosensitive (ES) Lubricant Usage // Abstracts of Reviewed Papers of 3rd International Conference "Mechatronic Systems and Materials" (MSM 2007) (27 – 29 September, 2007, Kaunas, Lithuania). – Kaunas, Technologija, 2007. – ISSN 1822-8283. – P. 164.
 27. Ngatu G.T., Wereley N.M., Karli J.O., Bell R.C. “Dimorphic magnetorheological fluids: exploiting partial substitution of microspheres by nanowires”. Smart Materials And Structures. Iop Publishing. Smart Mater. Struct. 17 (2008) 045022 (8p).
 28. Sung Taek Lim, Hyoung Jin Choi, and Myung S. Jhon. “Magnetorheological Characterization of Carbonyl Iron-Organoclay Suspensions” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No. 10, October 2005, 37-45.
 29. Sung Taek Lim, Min Seong Cho, In Bae Jang, Hyoung Jin Choi “Magnetorheological characterization of carbonyl iron based suspension stabilized by fumed silica”. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 282 (2004) 170–173

30. Judson E. Goodrich, Roger S. Porter. A rheological interpretation of torque-rheometer data. *Polymer Engineering & Science*. Volume 7, Issue 1, pages 45–51.
31. Roe E. Wells Jr., M.D., Robert Denton, M.D., Edward W. Merrill, D.Sc. Measurement of viscosity of biologic fluids by cone plate viscometer. *The journal of laboratory and clinical medicine*. Volume 57, Issue 4, Pages 646–656.
32. M. Mooney, R. H. Ewart. The Conicylindrical Viscometer. *Journal of applied physics*. J. Appl. Phys. 5, 350.
33. Chun Shen, Ulrich Heinz, Jean-François Paquet, Igor Kozlov, and Charles Gale. Anisotropic flow of thermal photons as a quark-gluon plasma viscometer. *Phys. Rev. C* 91, 024908 – Published 19 February 2015
34. Hung, S. S. Farshidi, Frank Jones, David Alavi, Mohammad Zia Harvey, John T Sadraie, H. Investigation of Wet-Process Asphalt Rubber Binder Testing with Modified Dynamic Shear Rheometer: Interim Report on Screening Tests.
35. Inventors: William Kordonski, Michael Natkin, Sergei Gorodkin . “Method and apparatus for measuring and controlling solids composition of a magnetorheological fluid” United States Patent. Patent number: 6.893.322.B2. Date of Patent May. 17, 2005
36. Inventors: Leo W. Davis . “Compressible fluid magnetorheological suspension strut” United States Patent. Patent number: 7.413.063.B1. Date of Patent Aug. 19, 2008
37. Inventors: Alan Fuchs, Faramarz Gordaninejad, Hatice Gecol, Ben Hu, Beril Kavlicoglu, Joko Sutrisno . “Nanostructured magnetorheological fluids and gels ” United States Patent. Pub. No : US 2008/0296530 A1. Pub. Date: Dec. 4, 2008
38. Grum T. Ngatu and Norman M. Wereley. “Viscometric and Sedimentation Characterization of Bidisperse Magnetorheological Fluids”. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 43, No. 6, June 2007
39. Sean Fitzgibbon, Eric S. G. Shaqfeh, Gerald G. Fuller, Travis W. Walker. Scaling analysis and mathematical theory of the interfacial stress rheometer. *Journal of rheology*. J. Rheol. 58, 999 (2014).
40. Dynamic characterization of extremely bidisperse magnetorheological fluids G.R. Iglesias, M.T. López-López, J.D.G. Durán, F. González-Caballero, A.V. Delgado
41. G. Yanga, B.F. Spencer, J.D. Carlsonb, M.K. Sainc. Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. *Engineering Structures*. Volume 24, Issue 3, March 2002, Pages 309–323
42. The Electrorheological property of a polyaniline-coated copolystyrene particle suspensijon, Kuramoto N., Yamazaki M., Nagai \k., Tanoka K., Yatsuzuka K., Japan.
43. M. Kciuk a, R. Turczyn b. Properties and application of magnetorheological fluids. 2009
44. Algimantas Bubulis, Vytautas Jurėnas „PJEZOMECHANIKA“ Vilnius 2008, 96100p.
45. Piezoelectricity. Domenų bazė. Prieiga internete: <http://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>
46. Bernard Jaffe. *Piezoelectric Ceramics*. 2012y.
47. Xinhua Zhu, Zhongyan Meng. Operational principle, fabrication and displacement characteristics of a functionally gradient piezoelectric ceramic actuator. 1995y
48. O. E. Mattiat. *Ultrasonic Transducer Materials*
49. Jan Tichý, Jirí Erhart, Erwin Kittinger, Jana Prívratká. *Fundamentals of Piezoelectric sensorics*
50. Prof. Dr. Antonio Arnau Vives. *Piezoelectric Transducers and Applications*
51. <http://www.piceramic.com/products/piezoelectric-materials.html>. Žiūrėta 2012.04
52. Kenji Uchino. *Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors*
53. Clinton Y. K. Chee, Liyong Tong, Grant P. Steven. A Review on the Modelling of Piezoelectric Sensors and Actuators Incorporated in Intelligent Structures. 2006y
54. Nazanin Bassiri-Ghab, *Piezoelectric MRMS: Materials and Devices*, Chapter 20

55. Reliability of piezoelectric multilayer actuators, konferencija, [interaktyvus] [žiūrėta 2011-04-19] prieiga internete:
http://www.piusa.us/technotes/piceramic_paper_piezoelectric_reliability_actuator2006_m.pdf
56. TianShu Song; Hassan, Ahmed. Dynamic Performance at Inner Tip of an Interfacial Crack near a Circular Cavity in Piezoelectric Bi-Materials. *Applied Mechanics & Materials* . 2014, Issue 665, p30-36. 7p.
57. Carmen GALASSI, Maria Dinescu, Kenji Uchino, Michael Sayer. *Piezoelectric Materials: Advances in Science, Technology and Applications*. Pages 103-218.
58. A. Hanafy, C. I. Zanelli. Quantitative Real-time Pulsed Schlieren Imaging of Ultrasonic Waves.// *IEEE Ultrasonics Symposium*, pg 1223, 1991
59. Yanding Qin, Yanling Tian , Dawei Zhang, Bijan Shirinzadeh. A Novel Direct Inverse Modeling Approach for Hysteresis Compensation of Piezoelectric Actuator in Feedforward Applications. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. Volume 18 Issue 3.
60. Lei Liu, Kok Kiong Tan, Silu Chen, Chek Sing Teo. Discrete Composite Control of Piezoelectric Actuators for High-Speed and Precision Scanning. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. Volume 9 Issue 2.
61. Mei-Ju Yang, Guo-Ying Gu, Li-Min Zhu. Parameter identification of the generalized Prandtl–Ishlinskii model for piezoelectric actuators using modified particle swarm optimization. *Sensors and Actuators A: Physical* Volume 189, 15 January 2013, Pages 254–265.
62. Yanfang Liu, Jinjun Shan, Ulrich Gabbert and Naiming Q. Hysteresis and creep modeling and compensation for a piezoelectric actuator using a fractional-order Maxwell resistive capacitor approach. *Smart Materials and Structures*, Volume 22, Number 11. Published 17 October 2013 • 2013 IOP Publishing Ltd.
63. Domenico Campolo, Ranjana Sahai, Ronald S. Fearing. Development of Piezoelectric Bending Actuators with Embedded Piezoelectric Sensors for Micromechanical Flapping Mechanisms.
64. Bending actuators. First international workshop on smart materials and structures. 2004 Germany. Piezoproducts.
65. Influence of large size magnetic particles on the magneto-viscous properties of ferrofluid. Kruti Shah¹, R V Upadhyay¹ and V K Aswal². Published 2012 • 2012 IOP Publishing Ltd *Smart Materials and Structures*, Volume 21, Number 7
66. S.Juršėnas. *Elektra ir magnetizmas (Paskaitų vaizdinė medžiaga)* Vilniaus universitetas 2002
67. K. Davey ; Neotonus Inc., New Smyrna Beach, FL, USA ; C. M. Epstein. Magnetic stimulation coil and circuit design.
68. Jacek F. Gieras. *Permanent Magnet Motor Technology– Design and Applications*, Second Edition,
69. W. G. Hurley ; Dept. of Electron. Eng., Univ. Coll. Galway, Ireland ; W. H. Wolfe. *Electromagnetic design of a magnetic suspension system*. 1997y
70. Leonie Boshoff-Mostert. *ELECTROMAGNETS*. *Electromagnets Script* Version 3.0. 2002 University of Nebraska.
71. <http://www.noliac.com/products/actuators/plate-benders/show/cmbp05/> . Prieiga per internetą. Žiūrėta 2013-09-18.
72. Vincent PIEFORT, Andre PREUMONT. Finite element modeling of piezoelectric structures.

73. R.J. Wood, E. Steltz, R.S. Fearing. Optimal energy density piezoelectric bending actuators. *Sensors and Actuators A* 119 (2005) 476–488.
74. EDWARD F. CRAWLEY and JAVIER DE LUIS. "Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures", *AIAA Journal*, Vol. 25, No. 10 (1987), pp. 1373-1385.
75. A. Baz, S. Poh. Performance of an active control system with piezoelectric actuators. *Journal of Sound and Vibration*. Volume 126, Issue 2, 22 October 1988, Pages 327-34.
76. Senthil V. Gopinathan, Vasundara V. Varadan, Vijay K Varadan. A review and critique of theories for piezoelectric laminates.
77. L.Q. Yao, J.G. Zhang, L. Lu, M.O. Lai. Nonlinear static characteristics of piezoelectric bending actuators under strong applied electric field. *Sensors and Actuators A: Physical*. Volume 115, Issue 1, 15 September 2004, Pages 168–175.
78. Fumio Narita, Yasuhide Shindo, Keisuke Hayashi. Bending and polarization switching of piezoelectric laminated actuators under electromechanical loading. *Computers & Structures*. Volume 83, Issues 15–16, June 2005, Pages 1164–1170. Modelling of Smart Structures.
79. R.J. Wood, E. Steltz, R.S. Fearing. Optimal energy density piezoelectric bending actuators. *Sensors and Actuators A: Physical* Volume 119, Issue 2, 13 April 2005, Pages 476–488.
80. Minoru Taya, Abdulhakim A. Almajid, Martin Dunn, Hirofumi Takahashi. Design of bimorph piezo-composite actuators with functionally graded microstructure. *Sensors and Actuators A: Physical*. Volume 107, Issue 3, 1 November 2003, Pages 248–260.
81. Fumio Narita, Yasuhide Shindo, Masaru Mikami. Analytical and experimental study of nonlinear bending response and domain wall motion in piezoelectric laminated actuators under ac electric fields. *Acta Materialia*. Volume 53, Issue 17, October 2005, Pages 4523–4529
82. Influence of large size magnetic particles on the magneto-viscous properties of ferrofluid. Kruti Shah¹, R V Upadhyay¹ and V K Aswal². Published 2012 • 2012 IOP Publishing Ltd *Smart Materials and Structures*, Volume 21, Number 7
83. David D. Braun, Meyer R. Rosen. *Rheology Modifiers Handbook– Practical Use and Application*
84. Xinglong Gong, Chaoyang Guo, Shouhu Xuan, Taixiang Liu, Luhang Zong and Chao Peng. Oscillatory normal forces of magnetorheological fluids. 2012y.
85. Hans Martin Laun, Claus Gabriel, Christoffer Kieburg. Wall material and roughness effects on transmittable shear stresses of magnetorheological fluids in plate–plate magnetorheometry.
86. Chaoyang Guo, Xinglong Gong, Shouhu Xuan, Luhang Zong, Chao Peng. Normal forces of magnetorheological fluids under oscillatory shear. 2012y
87. Hongting Pu, Fengjing Jiang. "Towards high sedimentation stability: magnetorheological fluids based on CNT/Fe₃O₄ nanocomposites". *Nanotechnology* 16 (2005) 1486–1489
88. T. R. Tuladhar, A. C. Mulji and M. R. Mackley. The rheological characterization of linear viscoelasticity for ink jet fluids using piezo axial vibrator and torsion resonator rheometers. 2009

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Tarptautinėse duomenų bazėse esančiuose mokslo leidiniuose paskelbti straipsniai

Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą

- 1.** Ramutis Bansevicius, Sigita Navickaitė, Vytautas Jūrėnas, Viktorija Mačiukienė, Genadijus Kulvietis, Dalius Mažeika. Piezoelectric laser beam deflector for space applications. // Journal of Vibroengineering / Vibromechanika, Lithuanian Academy of Sciences, Kaunas University of Technology, Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius : Vibromechanika. ISSN 1392-8716. JVE INTERNATIONAL LTD. JOURNAL OF VIBROENGINEERING. MAR 2016, VOL. 18, ISSUE 2. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC; Academic Search Complete; Computers & Applied Sciences Complete]. [Indėlis: 0,250]. [IF (E): 0,323 (2016)]
- 2.** Bubulis, Algimantas; Jūrėnas, Vytautas; Navickaitė, Sigita; Rugaitytė, Viktorija. Investigation of motion control of piezoelectric unimorph for laser shutter systems // Journal of Vibroengineering / Vibromechanika, Lithuanian Academy of Sciences, Kaunas University of Technology, Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius : Vibromechanika. ISSN 1392-8716. 2010, Vol. 12, no. 4, p. 533-540. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC; Academic Search Complete; Computers & Applied Sciences Complete]. [Indėlis: 0,250]. [IF (E): 0,323 (2010)]
- 3.** Bansevicius, Ramutis Petras; Bubulis, Algimantas; Dragašius, Egidijus; Jūrėnas, Vytautas; Mačiukienė, Viktorija; Navickaitė, Sigita. Control of piezoelectric scanner dynamics using magnetorheological fluid // Journal of Vibroengineering / Vibromechanika, Lithuanian Academy of Sciences, Kaunas University of Technology, Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius : Vibromechanika. ISSN 1392-8716. 2011, Vol. 13, no. 4, p. 755-763. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC; Academic Search Complete; Central & Eastern European Academic Source (CEEAS); Computers & Applied Sciences Complete; Current Abstracts; TOC Premier]. [Indėlis: 0,167]. [IF (E): 0,346 (2011)]
- 4.** Dragašius, Egidijus; Jūrėnas, Vytautas; Mačiukienė, Viktorija; Navickaitė, Sigita. Investigation of magneto-rheological fluid parameters using cantilever -type piezoactuator // Journal of Vibroengineering / Vibromechanika, Lithuanian Academy of Sciences, Kaunas University of Technology, Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius : Vibromechanika. ISSN 1392-8716. 2012, Vol. 14, no. 1, p. 189-195. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC; Academic Search Complete; Central & Eastern European Academic Source (CEEAS); Computers & Applied Sciences Complete; Current Abstracts; TOC Premier]. [Indėlis: 0,250]. [IF (E): 0,452 (2012)][Indėlis grupėje: 0,667]

Mokslinio išradimo LR patentas:“Piezoelektrinė lazerio spindulio precizinio pozicionavimo pavara (G02B 27/62)

SL344. 2016-07-25, 16,75 leidyb. apsk. l. Tiražas 12 egz. Užsakymas 287.
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas

PRIEDAI

PRIEDAS 1

IP-1/98 forma

LIETUVOS RESPUBLIKOS
VALSTYBINIAM PATENTŲ BIURUI
Kalvarijų g. 3, LT-2600 Vilnius

**PRAŠYMAS
IŠDUOTI PATENTĄ**

22	Paraiškos gavimo data *	2010 10 26
21	Paraiškos numeris *	2010 097
11	Patento numeris *	

* Užpildo Valstybinis patentų biuras

Paraiškejo žyma: KTU

71	Paraiškejo pavadinimas / vardas, pavardė, adresas, telefonas, faksas, valstybės kodas Kauno Technologijos Universitetas K.Donelaičio g. 73, LT-44249, Kaunas	74	Patentinio patikėtinio vardas, pavardė, liudijimo numeris, adresas, telefonas, faksas Aurelija Šidlauskienė(liud. Nr. 25), K.Būgos g. 29, LT-44326, Kaunas Tel. 8698-78725 El.p. aurelijosfirma@gmail.com			
54	Pjezoelektrinė lazerio spindulio precizinio pozicionavimo pavara		Atstovo pavadinimas / vardas, pavardė, adresas, telefonas, faksas			
31	32	33	36	Anksčiau paduotos paraiškos numeris, data, valstybės kodas	51	Tarptautinės patentų klasifikacijos indeksai G 02 B 27/62
72	Išradėjo vardas, pavardė, adresas, telefonas, faksas, valstybės kodas Ramutis Bansevicius, Eivenių g.41-40, LT-51062, Kaunas Algimantas Bubulis, Ciobrelių takas 48, LT-52177, Kaunas Vytautas Jurėnas, P.Višinskio 17-2, LT-44151, Kaunas, Sigita Navickaitė, Baltijos g. 84-32, LT-49215, Kaunas Viktorija Mačiukienė, Pašilės g. 39-305, LT-51358, Kaunas Valdas Grigaliūnas, Sukilėlių pr. 87A-43, LT-49233, Kaunas					



Sis dokumentas su Valstybinio patentų biuro užpildytais rekvizitais yra paraiškos priėmimo pažyma. 8:267

Paraiškų priėmimo ir
rašytinio patalpinimo skyrius

.....
(parašas)

.....
(vardas, pavardė)

Data 2010-10-27

Pjezoelektrinė lazerio spindulio precizinio pozicionavimo pavana

Išradimas yra priskiriamas prietaisų sričiai, konkrečiai optinių elementų lazerio spindulio valdymo sričiai.

Yra žinoma tiesialinijinio judesio pjezoelektrinė pavana, kurios veikimas paremtas dviejų aktyvių elementų kontakto zonoje būdu (žiūr. TSRS aut. liud. Nr. 541663, 1975). Šioje konstrukcijoje, abiejose kontaktuojančiose grandyse, pagamintose iš pjezoelektrinės medžiagos, iš kurių viena nejudamai įtvirtinta virpesių mazge, o kita – galinti atlikti slenkamąjį judesį, yra žadinami rezonansiniai virpesiai, kurių kryptys yra statmenos viena kitai. Dėl šio virpesių statmenumo, kontakto zonoje generuojami aukšto dažnio įstriži smūgiai, dėl kurių judanti grandis įgauna slenkamąjį judesį.

Nurodyto įrenginio konstrukcijoje abi rezonuojančios grandys pagamintos iš pjezoelektrinės medžiagos, kurios matmenų ir masės minimizavimas yra technologiškai sudėtingas procesas, todėl judanti grandis sužadina didesnes inercines jėgas, kurios neigiamai veikia dinamines pavaros charakteristikas.

Yra žinomas masės centravimo įrenginys, veikiantis įstrižų smūgių judesio generavimo principu (žiūr. Lietuvos mokslas, VIBROENGINEERING, Virpesių mechanika ir technika, Lithuania Academia Scientiarum, Ramutis Bansevicius, 1998, 19 knyga, 106-107 p.). Šiame įrenginyje naudojamą pjezoelektrinę pavara sudaro trys pjezoelementai, kur du iš jų tvirtinami korpuse virpesių mazguose. Du nejudantys pjezoelementai su trečiuoju, judančiu, kontaktuoja dviejose

kontakto zonose. Nejudantys elementai atlieka priešingų fazių to paties dažnio rezonansinius virpesius, o šių virpesių kryptys yra statmenos judančiosios grandies rezonansiniams virpesiams, kurie sutampa su nejudančių grandžių rezonansiniais dažniais.

Dėl šių rezonansinių virpesių krypčių statmenumo, dviejose įrenginio grandžių kontakto zonose atsiranda įstriži vienos krypties aukšto dažnio smūgiai, todėl judančioji grandis įgauna tiesialinijinį judesį. Nurodytame prototipe judančioji grandis, yra pjezoelementas, kurio matmenų ir masės minimizavimas yra technologiškai sudėtingas procesas, todėl įrenginyje pasireiškia didesnės inercinės jėgos, kurios neigiamai veikia dinamines įrenginio charakteristikas.

Tikslas – sumažinti judančiosios grandies inercines jėgas ir tuo padidinti įrenginio greitaiegiškumą.

Išradimo tikslas pasiekiamas tuo, kad pjezoelektrinėje lazerio spindulio precizinio pozicionavimo pavaroje, susidedančioje iš korpuso, judesio mechanizmo ir valdymo bloko, prie korpuso viršutinės dalies yra standžiai pritvirtinti du nuolatiniai magnetai, o judesio mechanizmą sudaro du pjezoelementai, kurie savo virpesių mazguose įtvirtinti korpuso priešingose vidinėse sienelėse, ant kurių yra uždėta judančioji grandis, valdoma elektromagnetine rite ir prie kurios vieno iš galų yra standžiai įtvirtintas lazerio spindulio dangtelis. Be to, judančioji grandis yra pagaminta iš TERFENOL –D magnetrostrikcinės medžiagos. Magnetrostrikcinės medžiagos pakeičia magnetinę energiją į mechaninę arba atvirkščiai. Jų santykinis pailgėjimo koeficientas, veikiant magnetiniam laukui, yra 2-5 kartus didesnis, nei pjezoelektrinių medžiagų, o masė mažesnė dėl mažesnių geometrinių parametrų. Tai

leidžia žymiai sumažinti judančios grandies inercines jėgas ir pagerinti greitaeigiškumą.

Išradimo esmė paaiškinama 1 figūroje, kurioje yra pavaizduota pjezoelektrinės lazerio spindulio precizinio pozicionavimo pavara: a- vaizdas iš priekio, b- vaizdas iš šono, c- vaizdas iš viršaus.

Pjezoelektrinė lazerio spindulio precizinio pozicionavimo pavara susideda iš korpuso 1, kuriame savo virpesių mazguose tvirtinami pjezoelementai 2 ir 3 bei nuolatiniai magnetai 4, pritvirtinti korpuso 1 viršutinėje dalyje. Nuolatinių magnetų 4 dėka judančioji grandis 5, kuri pagaminta iš magnetrostrikcinės medžiagos TERFENOL-D, uždėta ant pjezoelementų 2, 3 yra pritraukiama prie pjezoelementų 2 ir 3 ir taip sukuriama dvi kontakto zonos. Lazerio spindulio dangtelis 6 standžiai tvirtinamas prie judančios grandies 5, kuri yra valdoma elektromagnetinės ritės 7.

Įrenginys dirba taip.

Valdymo bloko pagalba (figūroje nepavaizduotas) elektriškai sužadinus, virpesių mazguose prie korpuso 1 pritvirtintus, pjezoelementus 2 ir 3, jie pradeda virpėti vienodais rezonansiniais dažniais, tačiau π fazių skirtumu ($U_1 \cos \omega t$ ir $U_1 \cos(\omega t + \pi)$). Magnetinės ritės 7 ($U \cos \omega / 2$) dėka, judančioji grandis 5, kuri yra pagaminta iš magnetrostrikcinės medžiagos TERFENOL-D, virpinama taip pat rezonansiniu dažniu ir yra pritraukiama prie pjezoelementų 2 ir 3 nuolatinių magnetų 4 dėka. Du nejudantys pjezoelementai 2 ir 3 su judančiąja grandimi 5, kontaktuoja dviejuose kontakto zonose. Nejudančių elementų 2 ir 3 generuojamų virpesių kryptys yra statmenos judančiosios grandies 5 kuriams virpesiams. Dėl šių rezonansinių

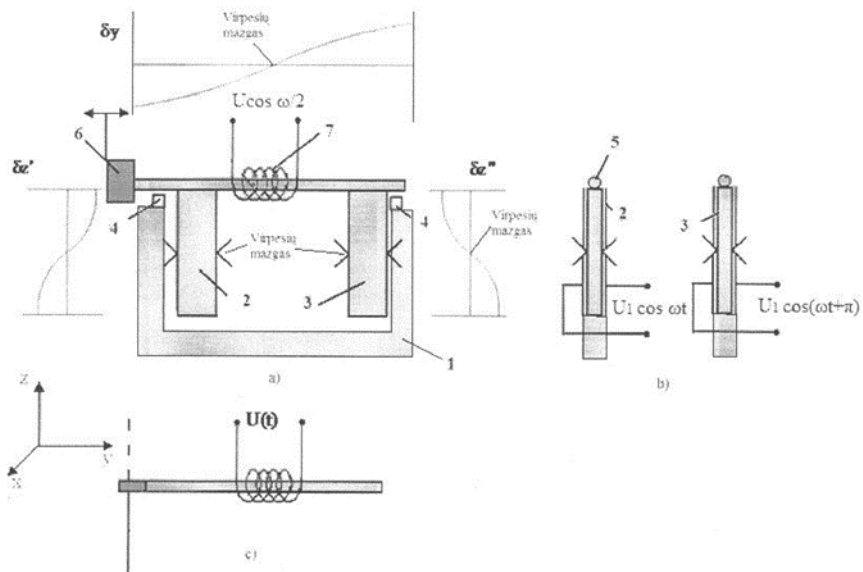
virpesių statmenumo, dviejoje įrenginio grandžių kontakto zonose atsiranda įstriži vienos krypties aukšto dažnio smūgiai, todėl judančioji grandis 5 kartu su prie jos pritvirtintu lazerio spindulio dangteliu 6, įgauna tiesialinijinį judesį ir taip lazerio spindulys yra uždengiamas. Pakeitus judančios grandies 5 virpesių fazę π skirtumu, gaunamas slenkamojo judesio reversas ir tokiu būdu lazerio spindulys yra atidengiamas.

Palyginus su prototipu, nauja konstruktyvių elementų visuma, dėka to, kad judančioji grandis yra pagaminta iš magnetostrikinės medžiagos TERFENOL-D, kurios santykinis pailgėjimo koeficientas, veikiant magnetiniam laukui, yra 2-5 kartus didesnis, nei pjezoelektrinių medžiagų, o masė mažesnė dėl mažesnių geometrinių parametrų, todėl žymiai sumažėja judančios grandies inercinės jėgos ir tai padidina įrenginio greitaeigiškumą.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Pjezoelektrinė lazerio spindulio precizinio pozicionavimo pavara, susidedanti iš korpuso, judesio mechanizmo ir valdymo bloko, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad prie korpuso viršutinės dalies yra standžiai pritvirtinti du nuolatiniai magnetai, o judesio mechanizmą sudaro du pjezoelementai, kurie savo virpesių mazguose įtvirtinti korpuso priešingose vidinėse sienelėse, ant kurių yra uždėta judančioji grandis, valdoma elektromagnetine rite ir prie kurios vieno iš galų yra standžiai įtvirtinamas lazerio spindulio dangtelis.

2. Pjezoelektrinė lazerio spindulio precizinio pozicionavimo pavara pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad judančioji grandis yra pagaminta iš TERFENOL –D magnetostrikinės medžiagos.



1 fig.

PRIEDAS 2

```
function out = model
%
% Kodas.m
%
% Model exported on Jun 4 2015, 09:07 by COMSOL 4.3.0.151.

import com.comsol.model.*
import com.comsol.model.util.*

model = ModelUtil.create('Model');

model.modelPath('D:\SK PAK DoktCOMSOL\pak2015');

model.modelNode.create('mod1');

model.geom.create('geom1', 2);

model.mesh.create('mesh1', 'geom1');

model.physics.create('mf', 'InductionCurrents', 'geom1');

model.study.create('std1');
model.study('std1').feature.create('stat', 'Stationary');
model.study('std1').feature('stat').set('sweeptype',
'sparse');
model.study('std1').feature('stat').set('plistarr_vector_start
', {});
model.study('std1').feature('stat').set('usesol', 'off');
model.study('std1').feature('stat').set('constraintgroup',
{});
model.study('std1').feature('stat').set('plot', 'off');
model.study('std1').feature('stat').set('adaption', 'off');
model.study('std1').feature('stat').set('notstudy', 'zero');
model.study('std1').feature('stat').set('plistarr', {});
model.study('std1').feature('stat').set('notsolnum', '1');
model.study('std1').feature('stat').set('plistarr_vector_numva
lues', {});
model.study('std1').feature('stat').set('plist', '');
model.study('std1').feature('stat').set('nottimeinterp',
'off');
model.study('std1').feature('stat').set('useloadcase', 'off');
model.study('std1').feature('stat').set('loadgroup', {});
model.study('std1').feature('stat').set('useparam', 'off');
model.study('std1').feature('stat').set('plistarr_vector_step'
, {});
model.study('std1').feature('stat').set('plistarr_vector_funct
ion', {});
```

```

model.study('std1').feature('stat').set('notsolmethod',
'init');
model.study('std1').feature('stat').set('plistarr_vector_metho
d', {});
model.study('std1').feature('stat').set('optimization',
false);
model.study('std1').feature('stat').set('geometricNonlinearity
', false);
model.study('std1').feature('stat').set('nott', '0');
model.study('std1').feature('stat').set('loadgroupweight',
{});
model.study('std1').feature('stat').set('probesel', 'all');
model.study('std1').feature('stat').set('loadcase', {});
model.study('std1').feature('stat').set('notsolvertype',
'none');
model.study('std1').feature('stat').set('geometricNonlinearity
Active', true);
model.study('std1').feature('stat').set('plistarr_vector_stop'
, {});
model.study('std1').feature('stat').set('pname', {});
model.study('std1').feature('stat').set('showGeometricNonlinea
rity', 'on');
model.study('std1').feature('stat').activate('mf', true);

model.geom('geom1').feature.create('sq1', 'Square');
model.geom('geom1').feature('sq1').set('size', '0.2');
model.geom('geom1').runAll;
model.geom('geom1').run('sq1');
model.geom('geom1').feature.create('sq2', 'Square');
model.geom('geom1').feature.remove('sq2');
model.geom('geom1').run('sq1');
model.geom('geom1').feature.create('r1', 'Rectangle');
model.geom('geom1').feature('r1').setIndex('size', '0.08', 0);
model.geom('geom1').feature('r1').setIndex('size', '0.03', 1);
model.geom('geom1').feature('r1').setIndex('pos', '0.06', 0);
model.geom('geom1').feature('r1').setIndex('pos', '0.07', 1);
model.geom('geom1').runAll;
model.geom('geom1').run('r1');
model.geom('geom1').feature.create('poll1', 'Polygon');
model.geom('geom1').feature('poll1').set('source', 'table');
model.geom('geom1').feature('poll1').setIndex('table', '0.06',
0, 0);
model.geom('geom1').feature('poll1').setIndex('table', '0.07',
0, 1);
model.geom('geom1').feature('poll1').setIndex('table', '0.14',
1, 0);
model.geom('geom1').feature('poll1').setIndex('table', '0.07',
1, 1);
model.geom('geom1').feature('poll1').setIndex('table', '0.14',
2, 0);

```



```
model.geom('geom1').feature('poll').setIndex('table', '0.13',
2, 1);
model.geom('geom1').feature('poll').setIndex('table',
'0.12155', 3, 0);
model.geom('geom1').feature('poll').setIndex('table', '0.13',
3, 1);
model.geom('geom1').feature('poll').setIndex('table',
'0.10175', 4, 0);
model.geom('geom1').feature('poll').setIndex('table', '0.122',
4, 1);
model.geom('geom1').feature('poll').setIndex('table',
'0.10175', 5, 0);
model.geom('geom1').feature('poll').setIndex('table', '0.115',
5, 1);
model.geom('geom1').feature('poll').setIndex('table', '0.125',
6, 0);
model.geom('geom1').feature('poll').setIndex('table', '0.115',
6, 1);
model.geom('geom1').feature('poll').setIndex('table', '0.125',
7, 0);
model.geom('geom1').feature('poll').setIndex('table', '0.1',
7, 1);
model.geom('geom1').runAll;
model.geom('geom1').feature('poll').setIndex('table', '0.1',
8, 1);
model.geom('geom1').feature('poll').setIndex('table', '0.175',
8, 0);
model.geom('geom1').runAll;
model.geom('geom1').feature('poll').setIndex('table', '0.075',
8, 0);
model.geom('geom1').runAll;
model.geom('geom1').feature('poll').setIndex('table', '0.075',
9, 0);
model.geom('geom1').feature('poll').setIndex('table', '0.115',
9, 1);
model.geom('geom1').runAll;
model.geom('geom1').feature('poll').setIndex('table',
'0.08825', 10, 0);
model.geom('geom1').feature('poll').setIndex('table', '0.115',
10, 1);
model.geom('geom1').runAll;
model.geom('geom1').feature('poll').setIndex('table',
'0.09825', 10, 0);
model.geom('geom1').runAll;
model.geom('geom1').feature('poll').setIndex('table',
'0.09825', 11, 0);
model.geom('geom1').feature('poll').setIndex('table', '0.122',
11, 1);
model.geom('geom1').runAll;
```

```

model.geom('geom1').feature('poll1').setIndex('table',
'0.07845', 12, 0);
model.geom('geom1').feature('poll1').setIndex('table', '0.13',
12, 1);
model.geom('geom1').runAll;
model.geom('geom1').feature('poll1').setIndex('table', '0.06',
13, 0);
model.geom('geom1').feature('poll1').setIndex('table', '0.13',
13, 1);
model.geom('geom1').runAll;
model.geom('geom1').feature.remove('r1');
model.geom('geom1').run('poll1');
model.geom('geom1').feature.create('r1', 'Rectangle');
model.geom('geom1').feature('r1').setIndex('size', '0.012',
1);
model.geom('geom1').feature('r1').setIndex('size', '0.047',
0);
model.geom('geom1').feature('r1').setIndex('pos', '0.058', 1);
model.geom('geom1').feature('r1').setIndex('pos', '0.0765',
0);
model.geom('geom1').runAll;
model.geom('geom1').run('r1');
model.geom('geom1').feature.create('r2', 'Rectangle');
model.geom('geom1').feature('r2').setIndex('size', '0.047',
0);
model.geom('geom1').feature('r2').setIndex('size', '0.012',
1);
model.geom('geom1').feature('r2').setIndex('pos', '0.0765',
0);
model.geom('geom1').feature('r2').setIndex('pos', '0.088', 1);
model.geom('geom1').runAll;
model.geom('geom1').feature('r2').setIndex('pos', '0.1', 1);
model.geom('geom1').runAll;
model.geom('geom1').run('r2');
model.geom('geom1').feature.create('r3', 'Rectangle');
model.geom('geom1').feature('r3').setIndex('size', '0.007',
1);
model.geom('geom1').feature('r3').setIndex('size', '0.0035',
0);
model.geom('geom1').feature('r3').setIndex('pos', '0.115', 1);
model.geom('geom1').feature('r3').setIndex('pos', '0.09825',
0);
model.geom('geom1').runAll;
model.geom('geom1').run;

```

MRF-140CG Magneto-Rheological Fluid

Description

LORD MRF-140CG fluid is a hydrocarbon-based magneto-rheological (MR) fluid formulated for general use in controllable, energy-dissipating applications such as shocks, dampers and brakes.

MRF-140CG fluid is a suspension of micron-sized, magnetizable particles in a carrier fluid. When exposed to a magnetic field, the rheology of MRF-140CG fluid reversibly and instantaneously changes from a free-flowing liquid to a semi-solid with controllable yield strength. Altering the strength of the applied magnetic field precisely and proportionally controls the consistency or yield strength of the fluid.

MRF-140CG fluid can be used in *valve mode* (fluid flowing through an orifice) or in *shear mode* (fluid shearing between two surfaces). In the absence of a magnetic field, MRF-140CG fluid flows freely or allows free movement. Upon application of a magnetic field, the fluid's particles align with the direction of the field in chain-like fashion, thereby restricting the fluid's movement within the gap in proportion to the strength of the magnetic field.

Features and Benefits

Fast Response Time – responds instantly and reversibly to changes in a magnetic field.

Dynamic Yield Strength – provides high yield strength in the presence of a magnetic field and very low yield strength in the absence of a magnetic field; allows for a wide range of controllability.

Temperature Resistant – performs consistently throughout a broad temperature range, meeting the requirements of demanding applications such as automotive shock absorbers.

Hard Settling Resistant – provides high resistance to hard settling; easily redispersed.

Non-Abrasive – formulated to not abrade the devices in which the MR fluid is used.

Application

For more information on MR technology, refer to the MR Design Guides located on www.lord.com/mr.

Mixing – Under common flow conditions, no separation is observed between particles and the carrier fluid. However, a degree of separation may eventually occur under static conditions. If needed, use a paint shaker to redisperse the particles into a homogeneous state prior to use.

Storage

Keep container tightly closed when not in use.

Typical Properties*

Appearance	Dark Gray Liquid
Viscosity, Pa-s @ 40°C (104°F) Calculated as slope 800-1200 sec ⁻¹	0.280 ± 0.070
Density	
g/cm ³	3.54-3.74
(lb/gal)	(29.5-31.2)
Solids Content by Weight, %	85.44
Flash Point, °C (°F)	>150 (>302)
Operating Temperature, °C (°F)	-40 to +130 (-40 to +266)

*Data is typical and not to be used for specification purposes.

LORD
AskUsHow™

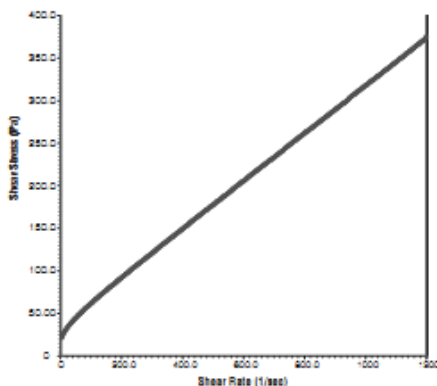
LORD TECHNICAL DATA

Cautionary Information

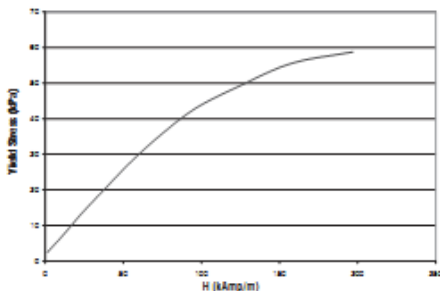
Before using this or any LORD product, refer to the Material Safety Data Sheet (MSDS) and label for safe use and handling instructions.

For industrial/commercial use only. Not to be used in household applications. Not for consumer use.

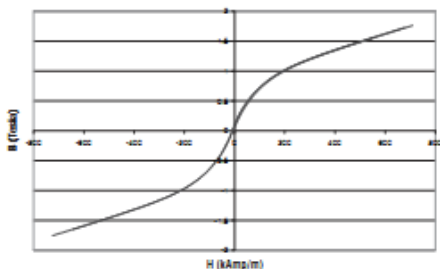
Shear Stress as a function of Shear Rate with no Magnetic Field applied at 40°C (104°F)



Yield Stress vs. Magnetic Field Strength



Typical Magnetic Properties



Values stated in this technical data sheet represent typical values as not all tests are run on each lot of material produced. For formalized product specifications for specific product end uses, contact the Customer Support Center.

Information provided herein is based upon tests believed to be reliable. In as much as LORD Corporation has no control over the manner in which others may use this information, it does not guarantee the results to be obtained. In addition, LORD Corporation does not guarantee the performance of the product or the results obtained from the use of the product or this information where the product has been repackaged by any third party, including but not limited to any product end-user. Nor does the company make any express or implied warranty of merchantability or fitness for a particular purpose concerning the effects or results of such use.

*"Ask Us How" is a trademark of LORD Corporation or one of its subsidiaries.

LORD provides valuable expertise in adhesives and coatings, vibration and motion control, and magnetically responsive technologies. Our people work in collaboration with our customers to help them increase the value of their products. Innovative and responsive in an ever-changing marketplace, we are focused on providing solutions for our customers worldwide. . . . Ask Us How.

LORD Corporation

World Headquarters

111 Lord Drive
Cary, NC 27511-7923
USA

Customer Support Center (in United States & Canada)
+1 877 ASK LORD (275 5873)

www.lord.com

©2006 LORD Corporation. CD 057012 (Rev. 1/1008)

LORD
AskUsHow™

LORD TECHNICAL DATA

MRF-122EG Magneto-Rheological Fluid

Description

LORD MRF-122EG fluid is a hydrocarbon-based magneto-rheological (MR) fluid formulated for general use in controllable, energy-dissipating applications such as shocks, dampers and brakes.

MRF-122EG fluid is a suspension of micron-sized, magnetizable particles in a carrier fluid. When exposed to a magnetic field, the rheology of MRF-122EG fluid reversibly and instantaneously changes from a free-flowing liquid to a semi-solid with controllable yield strength. Altering the strength of the applied magnetic field precisely and proportionally controls the consistency or yield strength of the fluid.

MRF-122EG fluid can be used in *valve mode* (fluid flowing through an orifice) or in *shear mode* (fluid shearing between two surfaces). In the absence of a magnetic field, MRF-122EG fluid flows freely or allows free movement. Upon application of a magnetic field, the fluid's particles align with the direction of the field in chain-like fashion, thereby restricting the fluid's movement within the gap in proportion to the strength of the magnetic field.

Features and Benefits

Fast Response Time – responds instantly and reversibly to changes in a magnetic field.

Dynamic Yield Strength – provides high yield strength in the presence of a magnetic field and very low yield strength in the absence of a magnetic field; allows for a wide range of controllability.

Temperature Resistant – performs consistently throughout a broad temperature range, meeting the requirements of demanding applications such as automotive shock absorbers.

Hard Settling Resistant – provides high resistance to hard settling; easily redispersed.

Non-Abrasive – formulated to not abrade the devices in which the MR fluid is used.

Application

For more information on MR technology, refer to the MR Design Guides located on www.lord.com/mr.

Mixing – Under common flow conditions, no separation is observed between particles and the carrier fluid. However, a degree of separation may eventually occur under static conditions. If needed, use a paint shaker to redispense the particles into a homogeneous state prior to use.

Storage

Keep container tightly closed when not in use.

Typical Properties*

Appearance	Dark Gray Liquid
Viscosity, Pa-s @ 40°C (104°F) Calculated as slope 800-800 sec ⁻¹	0.042 ± 0.020
Density	
g/cm ³	2.28-2.48
(lb/gal)	(19.0-20.7)
Solids Content by Weight, %	72
Flash Point, °C (°F)	>150 (>302)
Operating Temperature, °C (°F)	-40 to +130 (-40 to +266)

*Data is typical and not to be used for specification purposes.

LORD
AskUsHow™

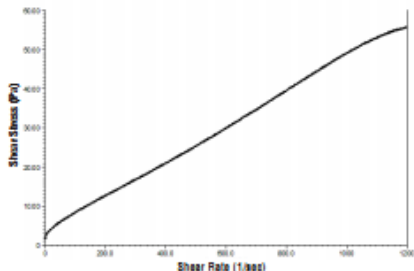
LORD TECHNICAL DATA

Cautionary Information

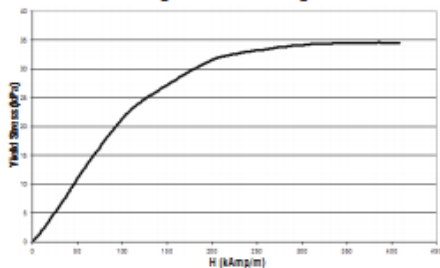
Before using this or any LORD product, refer to the Material Safety Data Sheet (MSDS) and label for safe use and handling instructions.

For industrial/commercial use only. Not to be used in household applications. Not for consumer use.

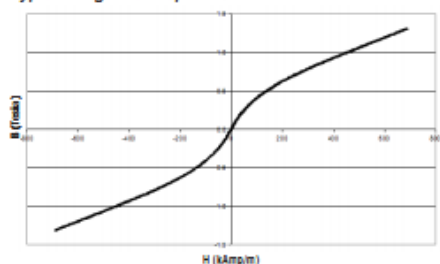
Shear Stress as a function of Shear Rate with no Magnetic Field applied at 40°C (104°F)



Yield Stress vs. Magnetic Field Strength



Typical Magnetic Properties



Values stated in this technical data sheet represent typical values as not all tests are run on each lot of material produced. For formalized product specifications for specific product end uses, contact the Customer Support Center.

Information provided herein is based upon tests believed to be reliable. In as much as LORD Corporation has no control over the manner in which others may use this information, it does not guarantee the results to be obtained. In addition, LORD Corporation does not guarantee the performance of the product or the results obtained from the use of the product or this information where the product has been repackaged by any third party, including but not limited to any product end-user. Nor does the company make any express or implied warranty of merchantability or fitness for a particular purpose concerning the effects or results of such use.

*Ask Us How® is a trademark of LORD Corporation or one of its subsidiaries.

LORD provides valuable expertise in adhesives and coatings, vibration and motion control, and magnetically responsive technologies. Our people work in collaboration with our customers to help them increase the value of their products. Innovative and responsive in an ever-changing marketplace, we are focused on providing solutions for our customers worldwide. . . . Ask Us How.

LORD Corporation

World Headquarters

111 Lord Drive
Cary, NC 27511-7923
USA

Customer Support Center (in United States & Canada)

+1 877 ASK LORD (275 5873)

www.lord.com

©2008 LORD Corporation. CD: 057027 (Rev. 1 7/08)

LORD
AskUsHow™