

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte
Radioelektronikas institūts

Emīls Stūrītis

**Maģistra profesionālo studiju programmas students “Viedās elektroniskās
sistēmas”(stud. apl. nr. x)**

“Bezkontakta strāvas mērītāja izstrāde”

Maģistra darbs

Zinātniskais vadītājs
Dr. inž., RTU ETF docents
Māris Zeltiņš

Rīga, 2023

Apstiprināts REI sēdē

„.....” 2022. gada

Institūta direktors:

Maģistra darba uzdevums

Maģistrants:	Emīls Stūrītis, x
Vadītājs (RTU):	Māris, Zeltiņš, Dr. inž., RTU ETF docents, x
Maģistra darba tēma latviešu valodā	Bezkontakta strāvas mērītāja izstrāde
Maģistra darba tēma angļu valodā	Development of a Non-contact Current Meter
Tēmas precizējums	Izpētīt un izstrādāt lētu bezkontakta strāvas mērītāju pielietojot magnetorezistīvos sensorus

Maģistra darba uzdevumi:

1. Izpētīt un salīdzināt bezkontakta strāvas mērīšanas tehnoloģijas;
2. Izvēlēties vismaz divus dažādu tehnoloģiju sensorus praktiskai pārbaudei.

Maģistra darba projekta daļas uzdevumi:

1. Izstrādāt elektriskās shēmas un spiestās plates mērierīcēm ar minētajiem sensoriem;
2. Veikt praktisku pārbaudi un rezultātu novērtējumu.

Maģistra darba saturu skatīt otrā pusē.

Maģistra darba iesniegšanas termiņš „.....”2022. g.

Maģistra darba uzdevums izsniegts „.....”2022. g.

Maģistra darba saturs¹

Izpildes datums	Nodaļa	Saturs
	1. Ievads	
	<ul style="list-style-type: none">• Aktualitāte;• Mērķis;• Uzdevumi;• Aprobācija (pielietojums);• Saturs;	
	2. Projekta izstrāde	
	<ul style="list-style-type: none">• Holla sensora mērītājs;• AMR sensora mērītājs;	
	3. Mērierīču pārbaude un eksperimenti	
	<ul style="list-style-type: none">• Holla sensora mērierīces;• AMR sensora mērierīce;	
	4. Tehniski ekonomiskais novērtējums	
	<ul style="list-style-type: none">• Rezultātu analīze;• Ekonomiskais novērtējums;	
	5. Secinājumi	
	6. Pielikumi	

Institūta direktors:

Maģistrants:

Vadītājs:

Konsultants:

¹ Izpildes termiņus, sadaļas, orientējošo apjomu (iekavas norādītam maksimālam iespējamam apjomam ir informatīvs raksturs), saturu norāda maģistra darba vadītājs.

Anotācija

Maģistra darbā “Bezkontakta strāvas mērītāja izstrāde” tika izstrādāti bezkontakta strāvas mērītāji, kuri bez jebkādas iejaukšanās ķēdē ir spējīgi nomērīt plūstošo strāvu vadītājā. Darbam ir vairāki posmi. Aplūkota strāvas un magnētiskā lauka attiecības un iespējamās magnētiskā lauka indukcijas vērtības paredzētajā strāvu diapazonā. Analizēti iespējamie izpildījumu mērījumu veikšanai. Tika salīdzinātas tehnoloģijas, kuras tiek pielietotas šādu sensoru izstrādē un ražošanā. Izstrādāt mērierīces ar izvēlētajiem un pieejamajiem sensoriem. Pārbaudīt izstrādāto mērierīču darbību veicot mērījumus. Veikti secinājumi par iegūtajiem rezultātiem šajā darbā.

Darba apjoms ir 61 lappuses, tas satur 54 attēlus, 10 tabulas un 7 formulas. Tajā ir atsaucis uz 35 informācijas avotiem un ir 10 pielikumi.

Abstract

In this master thesis work “Development of a Non-contact Current Meter”. There are several stages to the thesis. The current/magnetic field ratios and possible magnetic field induction values within the predicted range of currents are considered. Analysis of possible performance measurements for sensors. The technologies used in the development and manufacture of such sensors were compared. Develop measuring devices with selected and available sensors. Check the performance of the measuring devices developed by measuring. Conclusions have been drawn on the results of this work.

This thesis contains 61 pages which have 54 pictures, 10 tables, 7 equations. There are 35 references to information sources, and it has 10 attachments.

Saturs

Saīsinājumi	8
Ievads	9
1 Bezkontakta magnētiskie strāvas mērīšanas metodes	10
1.1 Bezkontaktu magnētiskie strāvas mērītāju izpildījumi	14
1.1.1 Moduļu tipa strāvas sensors	14
1.1.2 Sensors ar iebūvētu strāvas vadītāju	15
1.1.3 Sensors ar ārēju vadītāju	16
1.2 Magnētiskā strāvas mērīšanas sensoru fizikas salīdzinājumi	19
1.2.1 Anizotropā efekta magnetorezistīvie sensori	19
1.2.2 Gigantiskā efekta magnetorezistīvie sensori	19
1.2.3 Tuneļa efekta magnetorezistīvie sensori	21
1.2.4 Holla sensori	22
1.3 Tirgū pieejamo iekārtu salīdzinājums	25
1.3.1 AIM TTI I-probe 520	25
1.3.2 Little bee	29
1.3.3 Iekārtu salīdzinājums	30
2 Projekta izstrāde	31
2.1 Holla sensora balstītās mērierīces izstrāde	31
2.1.1 Principiālās shēmas izstrāde	31
2.1.2 Iespiestās plates izklājums	33
2.2 AMR sensora balstītās mērierīces izstrāde	35
2.2.1 Principiālās shēmas izstrāde	36
2.2.2 Iespiestās plates izklājums	40
3 Eksperimenti	41
3.1 DRV5053 mērierīces pārbaude un eksperimenti	41
3.1.1 Sensoru izejas sprieguma attiecība pret vadītāja platumu un strāvu	41
3.2 HMC1051 mērierīces pārbaude un eksperimenti	47
3.2.1 Ierīces darbības pārbaude	47
3.2.2 Ierīces mērījumi dažāda platuma celiņiem un dažādām strāvas vērtībām	51
4 Tehniski ekonomiskais novērtējums	56
4.1 Rezultātu analīze	56
4.2 Ekonomiskais novērtējums	56
5 Secinājumi	57

6	Izmantotā literatūra	58
7	Pielikumi	61

Saīsinājumi

Nr.p.k.	Saīsinājums	Angliski	Latviskais tulkojums
1.	MR	Magnetoresistance	Magnetorezistivitāte
2.	MCS	Magnetic current sensing	Magnētiskā strāvas mērīšana
3.	AMR	Anizotropa magneto pretestība	Anizotropa magneto pretestība
4.	GMR	Giant magnetoresistance	Gigantiska efekta magnetorezistori
5.	TMR	Tunnel magnetoresistance	Tuneļa efekta magnetorezistīvie sensori
6.	PCB	Printed circuit board	Iespiedplate
13.	QFN	Quad-flat no-leads	Maza korpusa mikroshēma bez izvadiem
14.	SOIC	Small outline integrated circuit	Maza korpusa mikroshēma

Ievads

Strāvas mērījumus ļoti bieži izmanto daudzu un dažādu iekārtu darbības uzraudzībai, kā arī var būt tieši iesaistītas to vadība. Ir dažādas metodes, lai veiktu mērījumus, katrai metodei ir savas priekšrocības un trūkumi.

Šī darba mērķis ir izveidot bezkontakta strāvas mērītāju, ar kuru būtu iespējams izmērīt caur vadītāju plūstošo strāvu. Lai sasniegtu mērķi, tika izvirzīti sekojošie uzdevumi:

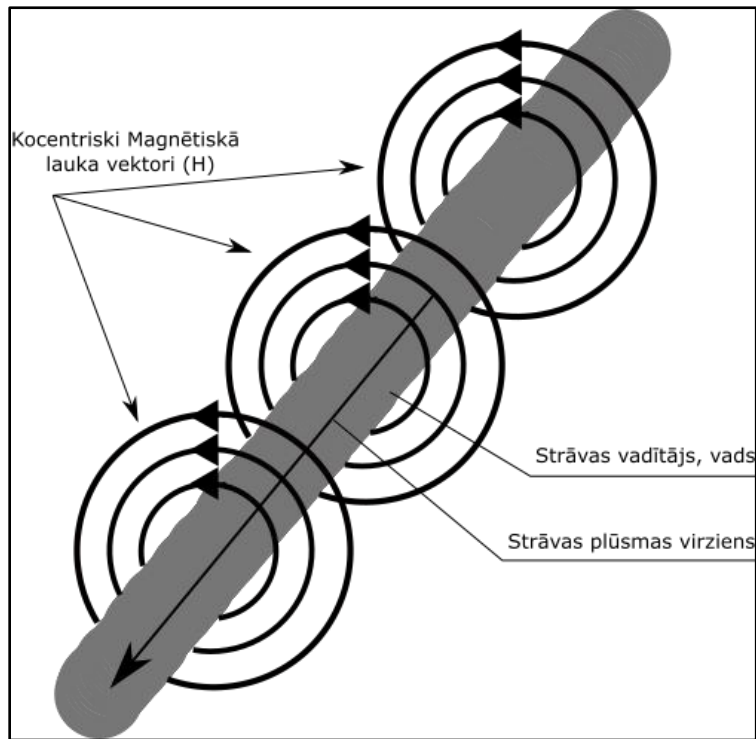
1. Iepazīties ar bezkontakta strāvas mērīšanas metodēm gan līdzstrāvas, gan maiņstrāvas ķēdēm.
2. Salīdzināt to priekšrocības un trūkumus.
3. Apskatīt tirgū pieejamo produktu parametrus un uzbūves veidus.
4. Uztādīt tehniskās prasības izstrādājamai mērierīcei.
5. Izstrādāt mērierīci un pārbaudīt, tās tehniskos parametrus.
6. Iegūt secinājums par izstrādāto mērierīci.

Šādas iekārtas izmantošana var būt nepieciešama elektronisku iekārtu izstrādes procesā. Ir nepieciešamība veikt mērījumus vienas iespiedplates robežās un nav iespējams izmanto citus, tradicionālākus mērītājus.

1 Bezkontakta magnētiskie strāvas mērīšanas metodes

Kā bezkontakta strāvas mērīšanu es uzskatu par sensoru pielietojumu, kur nav nepieciešams ielikt sensoru virknē plūstošai strāvai, šādi ienesot papildus zudumus, parazītiskas īpašības un papildus komponentus uz iespīestās plates.

Strāva, kas plūst caur vadītāju, ap to rada magnētisko lauku. Piemēram, apaļa vada gadījumā lauks ir kā koncentriski loki (att.1.1). [11]



1.1.att. Strāvas virziens un tā radītie lauki

Bio-Savāra-Laplasi likums ir vienādojums, kas apraksta magnētisko lauku, kuru ģenerē konstanta strāva. Tas saista magnētiskā lauka indukcijas lielumu ar strāvas vadītāja attālumu un strāvas virzienu. [11]

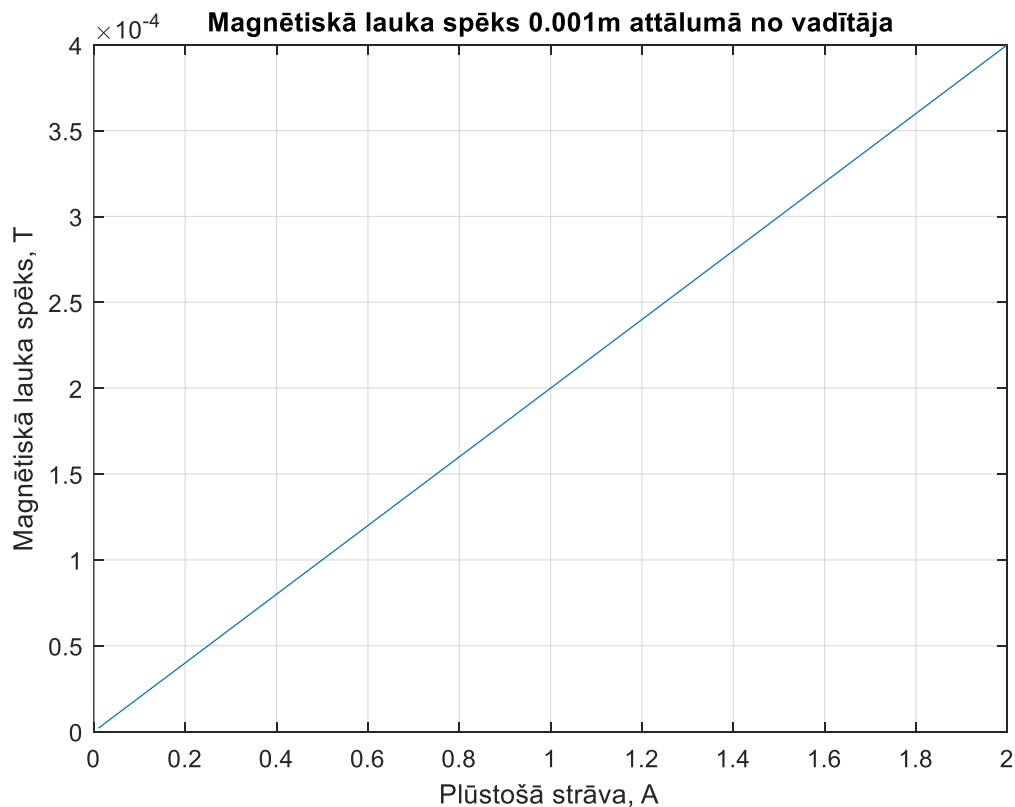
$$B = \frac{I \cdot \mu}{2\pi r}, \quad (1.1)$$

kur, B – kopējā magnētiskā indukcija, T;

I – pa vadītāju plūstošā strāva, A;

μ – $\mu_r \cdot \mu_0$, relatīvā magnētiskā caurlaidība un magnētiskā caurlaidība, H/m;

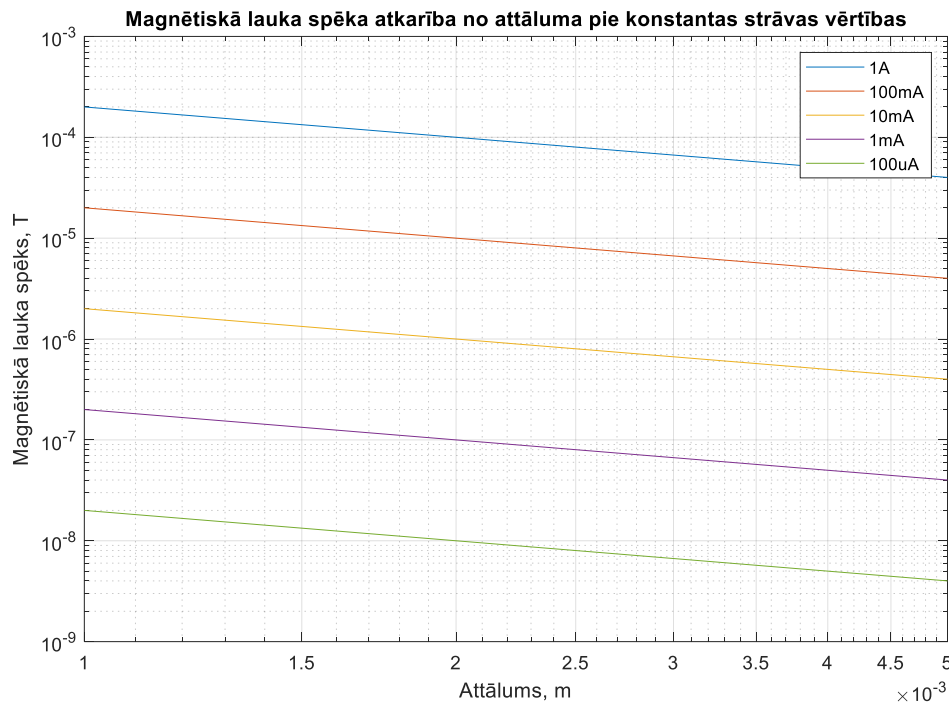
r – aprēķināmā punkta attālums no vadītāja centra, m;



1.2.att. Magnētiskā lauka indukcija 1mm attālumā no vadītāja pie dažādām strāvas vērtībām.

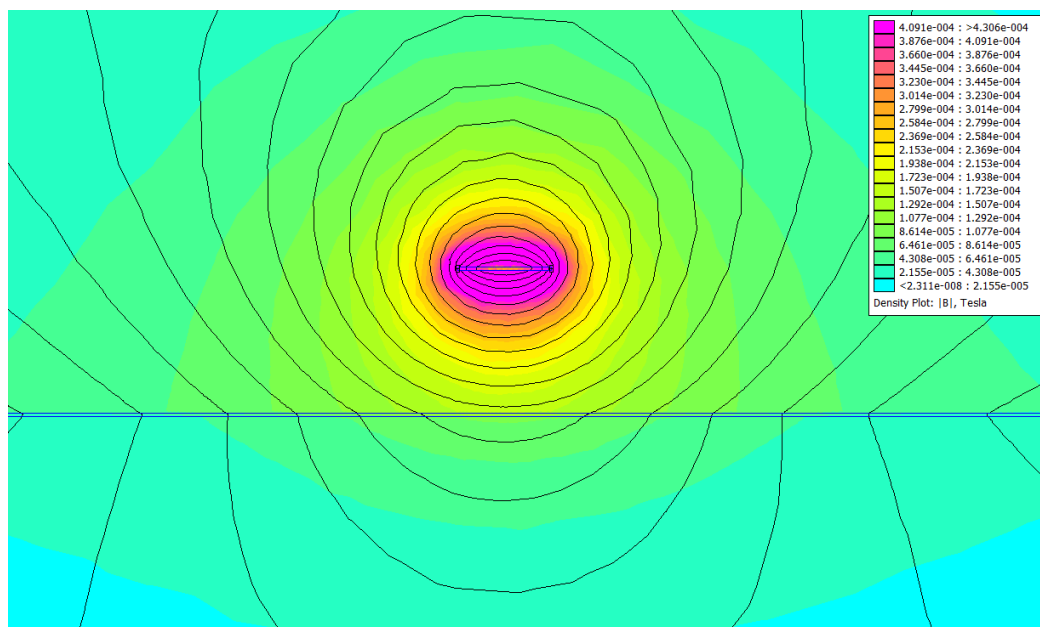
Apskatot magnētiskā lauka indukciju ap vadītāju 1mm attālumā, magnētiskā lauka indukcija ir novērojama vērtībās no $20\mu\text{T}$ līdz 0.2mT .

Redzot šo grafiku (1.3.att.), kad magnētiskā lauka indukcija 1mm attālumā no vadītāja, ir tikai $2\mu\text{T}$ pie 10mA strāvas. Šā darba ietvaros nav paredzēts mērīt magnētiskā lauka indukciju nost no iespiedplates, jo ir iespēja piekļūt pie vadītājiem uz iespiedplates un attālums nebūs lielāks, par 1mm vai 2mm starp vadītāja virsmu un sensora korpusu. Bet citos pielietojumos šāds attālums varētu būt neiespējams, jo ir lielāki darba spriegumi, kur ir nepieciešamas lielākas atstarpes starp vadītājiem un citiem komponentiem, mērīt strāvu, kas plūst pa vadu, kuram ir bieža izolācija.

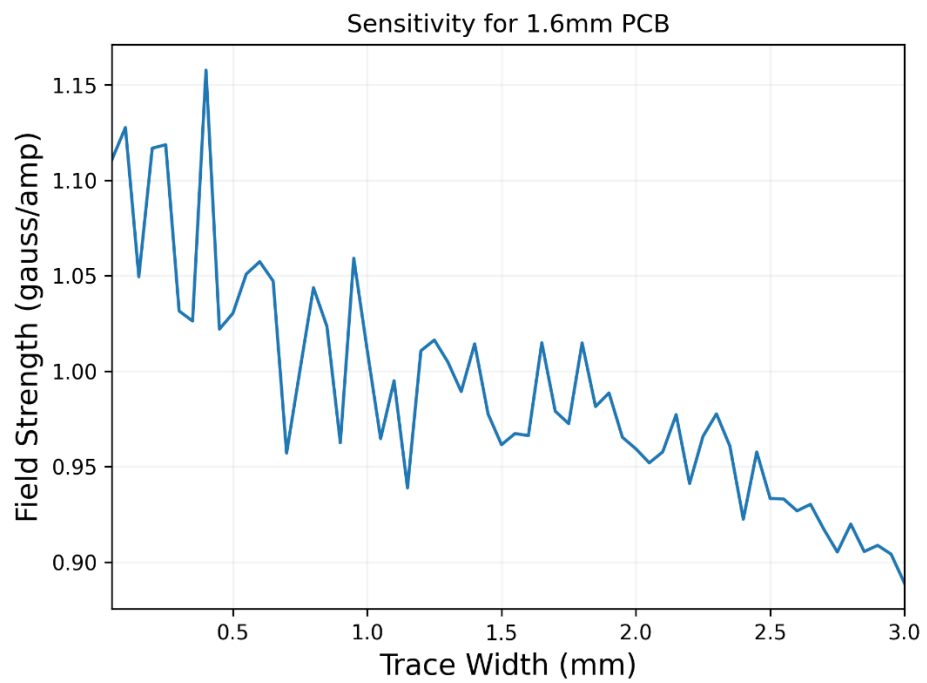


1.3.att. Magnētiskā lauka indukcijas atkarība no attāluma līdz vadītājam, vērtību diapazonā no 1mm līdz 5mm

Apskatot rezultātus, ir redzams, ka būs nepieciešams mērīt magnētisko lauku vērtības no $20\mu\text{T}$ līdz 2mT. Apskatot simulāciju, kuru ir veicis Little-Bee izstrādātājs[25]



1.4.att. Magnētiska lauka spēka simulācija ap 1mm vadītāju uz augšējā slāņa un pilnu pārklājumu apakšējā slānī un 1.6mm biezu iespaidlati un 1A lielu strāvu [25]



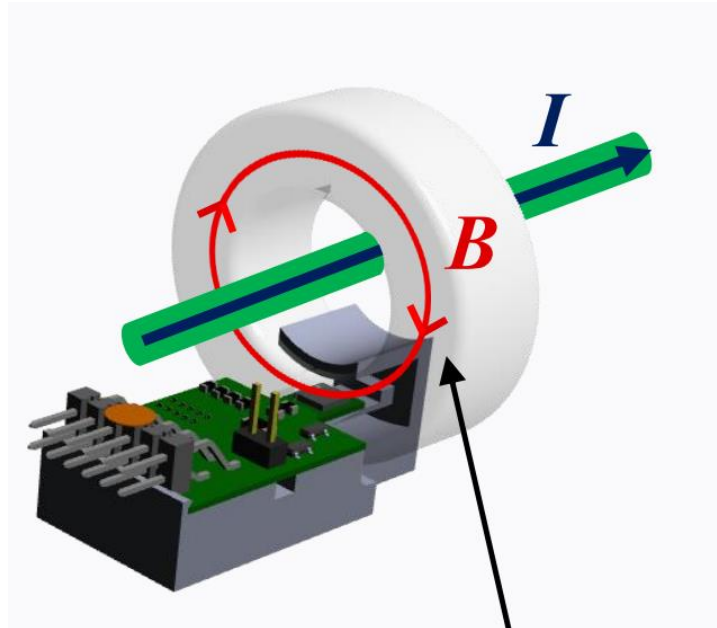
1.5.att. Simulētā magnētiskā lauka atkarība no celiņa platuma uz iespiedplates [25]

1.1 Bezkontakta magnētiskie strāvas mērītāju izpildījumi

Magnētiskie strāvas sensori ir iedalāmi trīs daļās: moduļu, ar iebūvētu (mikroshēmā) un ārēju vadītāju.

1.1.1 Moduļu tipa strāvas sensors

Šāds sensors sastāv no toroidālas serdes no feromagnētiska materiāla un Holla sensora, kurš mēra koncentrētā lauka indukciju.



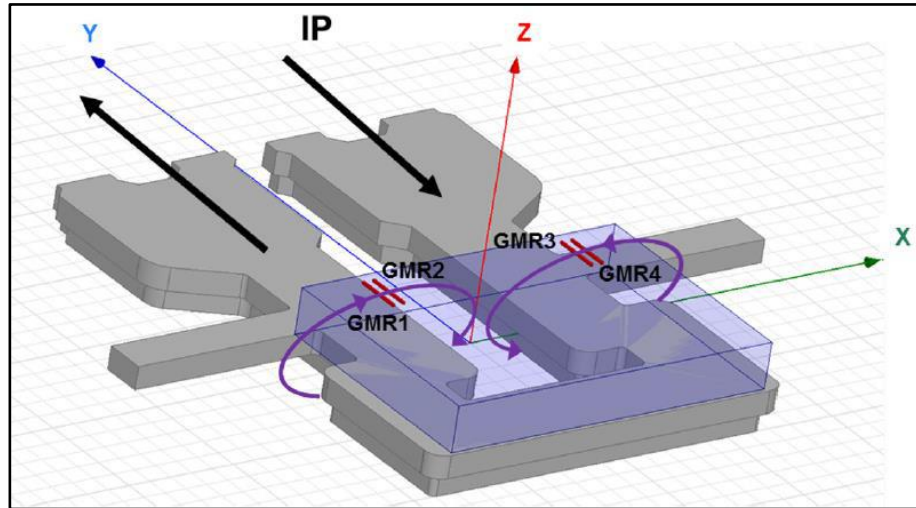
1.1.1.att. Moduļa tipa strāvas sensors[24]

Ir iespējami dažāda veida un formas serdes-magnētiskā lauka koncentratori. Ir ļoti daudzi pielietojumi, kad tiek izmantoti papildus tinumi uz serdes, kas kopā ar atgriezenisko saiti no Holla sensora izejas uzturētu serdes piesātinājumu tuvu nullei. Pielietojot šādu metodi, var iegūt augstāku precizitāti un linearitāti. Bez kompensācijas tinuma ķēde ir ietekmējama no temperatūras ietekmes, serdes piesātinājuma un pats Holla sensors arī ievieš nobīdes un kļūdas sistēmā. Metodi bez kompensācijas tinuma sauc par *Open-loop current sensing* jeb (mērīšana bez atgriezeniskās saites). Un metodi, kur tiek ņemta vērā atgriezeniskā saite, no izejas sauc par *closed-loop current sensing* jeb (mērīšana ar atgriezenisko saiti). Sensora izejas spriegums, kurš ir proporcionāls, serdes magnētiskajam laukam tiek, pastiprināts un pārvērsts par strāvas signālu, kuru vada pa kompensācijas tinumu. Un tad radītais magnētiskais lauks ir tāds pats tikai ar pretēju virzienu, lai kompensētu radīto lauku no primārā vadītāja. Un, ja šī sistēma strādā pareizi, tad ir iespējams iegūt mērāmo strāvu primārajā tinumā, no tinumu attiecības un strāvas vērtības kompensācijas tinumā. Arī pielietojumā ar atgriezenisko saiti ir sarežģījumi, sakarā ar kompensācijas tinuma vadīšanai nepieciešamajiem komponentiem tiek aizņemts lielāks laukums uz iespiedplates, lielāka cena izstrādei un ražošanai, un arī mēriekārtai ir lielāks enerģijas patēriņš.

1.1.2 Sensors ar iebūvētu strāvas vadītāju

Sensor in-package (sensors mikroshēmas korpusā) šādā izpildījumā strāvas vadītājs, ap kuru atrodas magnētiskā lauka koncentrators, un Holla vai arī magnetorezistīvie sensori. Un visi šie komponenti atrodas izmēros mazā korpusā, kas ir paredzēs montēšanai uz iespiedplates.

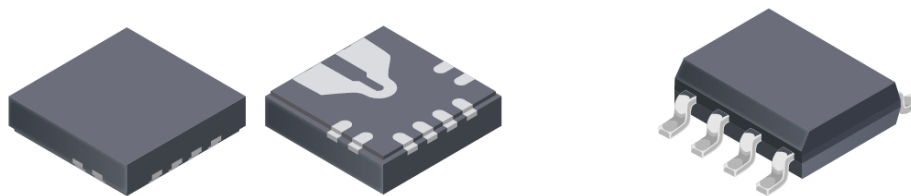
Šim sensoram strāvas vadošais elements ir iebūvēts korpusā, un ap to ir novietoti magnetorezistīvie sensori. Pa vadītāja pakava veida izliekumu plūstošā strāva rada koncentrētāku lauku, ko uztver sensori. Šādu sensoru esmu apskatījis iepriekš, izstrādājot bakalaura darbu. [16]



1.1.2.att. Iebūvētā tipa sensora iekšējā vadītāja uzbūve un magnetorezistoru novietojums. [16]

Šāda tipa korpusos tiek pielietoti dažādi sensoru tipi: Holla, AMR, GMR un TMR. Lielā atšķirība un priekšrocība šim pielietojumam no apkārtējās vides sensoriem, ir tas, ka ražotājs ir spējīgs kalibrēt un dot lielāku drošumu mērījumu precizitātēm, jo vadītājs un sensors atrodas fiksētā attālumā atbilstoši ražošanas tehnoloģijai.

Korpusa un strāvas vadītāja izmēri ietekmē mērāmās strāvas lielumus un darba izolācijas spriegumus. Atkarībā no ražotāja mērāmo strāvu diapazoni ir no $\pm 5A$ līdz pat $\pm 200A$ ar izolācijas sprieguma vērtību līdz 4800VDC, starp primārajiem un sekundārajiem izvadiem. Kā arī šādiem strāvas mērītājiem ir nepieciešami samērā maz papildus komponenti, lai nodrošinātu viņu darbību. Piemēram, Allegro piedāvātā sērija ar strāvas sensoriem līdz 50A, ar darba spriegumu zem 100V, biežāk piedāvātie korpusi ir QFN, un SOIC ar ārējiem izmēriem no 3x3mm līdz 5x5mm. [32]



1.1.3.att. Piedāvāto sensoru iepakojumi QFN un SOIC [32]

Ja ir nepieciešamība pēc lielākas strāvas vai darba sprieguma izolācijas, ir arī pieejami citi korpusi no šī paša ražotāja. Arī piedāvā *Small outline integrated circuit* SOIC iepakojumu, bet vēl papildus tiek piedāvāts lielāks korpuss, kura izmēri (bez izvadiem) ir jau 10x13mm.



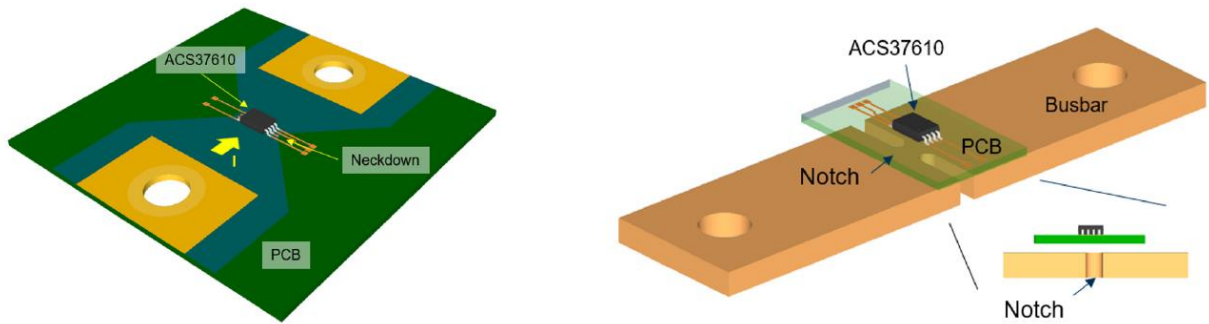
1.1.4.att. Caurumu montāžas, caurumu un virsmas montāžas, un virsmas montāžas versija [32]

Šādiem sensoriem ir savas priekšrocības un trūkumi. Priekšrocības jau aprakstīju - kalibrācija no ražotāja, mazie izmēri, liels izolācijas spriegums utt.. Bet ir arī savi trūkumi. Iebūvētais vadītājs ienes mērāmajā ķēdē papildus pretestību un induktāti. Ar zudumu pretestībām rodas izkliedētā jauda šajos vadītājos, un tās tiek izlikts siltumā, kas spēj ietekmēt mērījumu precizitāti.

1.1.3 Sensors ar ārēju vadītāju

Ambient sensori ar ārēju vadītāju. Šādam sensoru tipam vairs nav iebūvēts strāvas vadītājs iepakojumā.

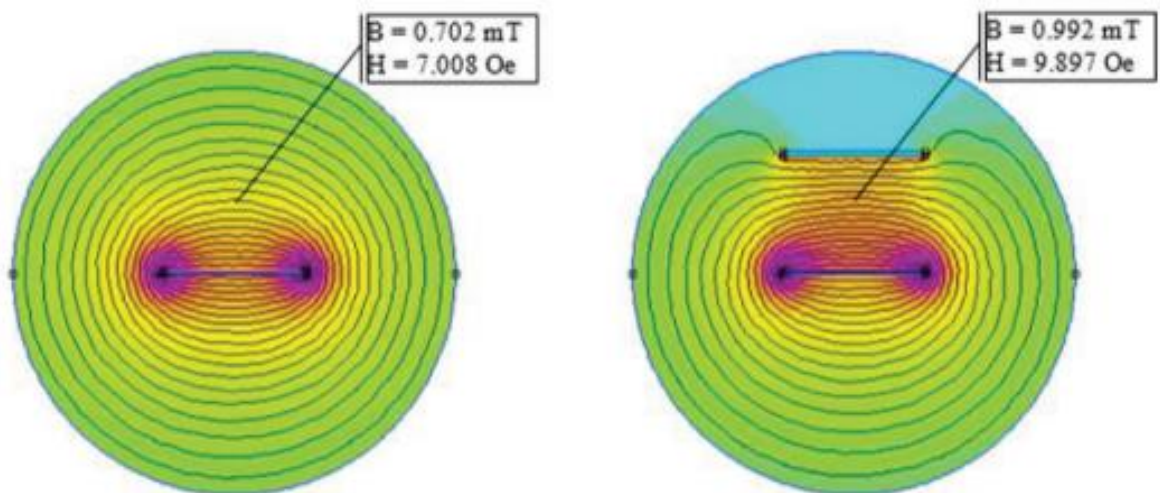
Sensori ar ārēju vadītāju tiek izgatavoti izmantojot, Holla, AMR, GMR un TMR tehnoloģijas. Izpildījumu veidi arī mainās. Sensors var atrasties uz iespiedplates augšējā slāņa, un strāvas vadītājs var iet zem mikroshēmas vienā vai vairākos slāņos (1.1.5.att. kreisais attēls). Vai arī atrasties uz atsevišķas spiestās plates, kura, mehāniski pielikta pie lielāka strāvas vadītāja (1.1.5.att. labais attēls).



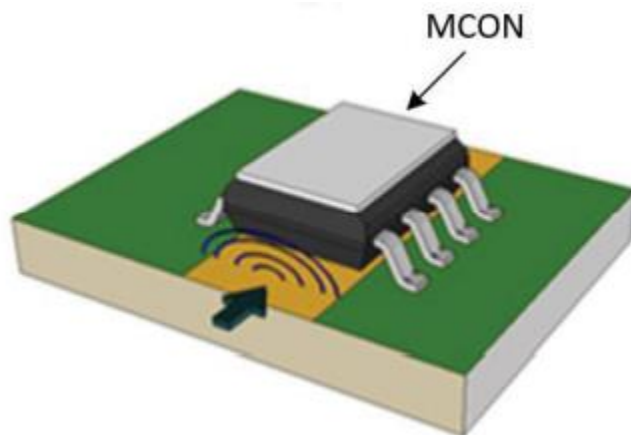
1.1.5.att. ACS37610 strāvas sensora pielietošana uz spiestās plates un kopā ar ārēju vadītāju. [33]

Šāda tipa sensorus piedāvā daudzi ražotāji, ar dažādiem diapazoniem, jutību un implementācijas īpatnībām. Izvēloties šādus, ir ļoti jāievēro ražotāja norādījumi, lai veiksmīgi notiktu implementācija iekārtās.

Notiek arī izpēte ar šādu sensoru jutības un traucējumu samazināšanai izmantojot planārus magnētiskā lauka koncentratorus, kas ļautu uzlabot esošiem sensoriem mērāmo strāvu frekvenču diapazonu.



1.1.6.att. Magnētiskais lauks kas radīts uz iespiedplates celiņa ar 5MHz frekvenci bez planāra koncentratora (pa kreisi) un ar koncentratoru (pa labi)[28]



1.1.7.att. AMR strāvas sensors ar planāru magnētiskā lauka koncentratoru [28]

Šādas izpētes ir svarīgas, jo pie lielākas frekvences uz vadītājiem arī iedarbojas *skin effect* virsmas strāvu efekts. Pie augstākām frekvencēm strāvas blīvums koncentrējas vadītāja ārējā slānī.

1.1.1. tabula

Sensoru izpildījumu salīdzinājums

Sensora tips	Moduļa	Korpusā iebūvētais	Ārēja vadītāja sensors
Mērāmās strāvas [A]	1...1000	0,001... 10000	0,001...10000
Izolācijas spriegums [V]	≥ 1000	≥ 1000	≥ 1000
Jutība pret ārējiem magnētiskajiem laukiem	Maza	Ir ietekme	Ir ietekme
Nepieciešamība pēc precīziem un īpašiem magnētiskā lauka koncentratoriem	Ir nepieciešams	Nav	Nav/ var būt bet netiek komerciāli izmantots
Temperatūras ietekme	Maza	Liela	Vidēja
Spiestās plates izklājums ietekme	Maza	Maza	Liela

1.2 Magnētiskā strāvas mērīšanas sensoru fizikas salīdzinājumi

Magnētiskā pretestība ir izmaiņa materiāla pretestībā, kad tiek pakļauts ārējam magnētiskajam laukam. Šeit apskatīšu pašu sensoru atklāšanu, teoriju aiz to darbības, pielietojumu dažādākajās sfērās un arī to pielietojumi tieši strāvas mērīšanas sakarā.

1.2.1 Anizotropā efekta magnetorezistīvie sensori

Pirmais magnetorezistīvo efektu atklāja *William Thomson* (Viljams Tomsons) 1856. gadā. Kad viņš eksperimentēja ar dzelzs gabaliem un pamanīja, ka pretestība palielinājās, kad strāvas un magnētiskie virzieni bija vienādi, un ka pretestība samazinājās, kad strāva un magnētiskais spēks bija perpendikulāri viens otram. Izmēģinot šo pašu eksperimentu ar niķeli, tika novērotas tādas pašas parādības, bet tikai daudz lielāka pretestības izmaiņa. Šādu principu sauc par anizotropisko magneto pretestību.

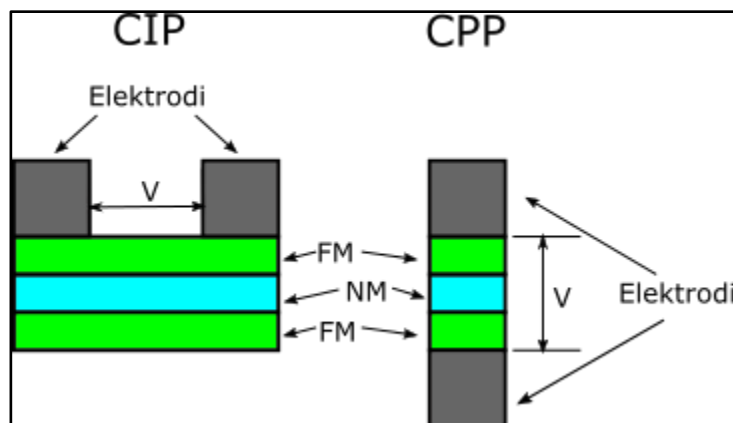
Tompsona eksperimenti ir paraugs tam, kā strādā AMR. Īpašība materiālam kuram pretestība ir atkarīga no leņķa starp magnetizāciju un plūstošo strāvu. Īpašība ienāk no vienlaikus notiekošas spinu orbītas un magnetizācijas iedarbības, un atkarībā no iesaistītajiem materiāliem tās rezultāts un precīzie darbības mehānismi var atšķirties.

Šos sensorus pielieto, zemes magnētiskā lauka mērīšanai, kompasa pielietojumos, leņķa un pozīcijas noteikšanai rotējošās sistēmās, kā arī tiek pielietots strāvas mērīšanai. Lielākie ražotāji, kuri ražo sensorus, ar AMR tehnoloģiju ir: Honeywell, NXP, STMicroelectronics un Sensitec.

1.2.2 Gigantiskā efekta magnetorezistīvie sensori

Aptuveni 130 gadus pēc magnētiskās pretestības principa atklāšanas un citu cilvēku pesimisma par jaunu uzlabotu materiālu, metožu atklāšanu divi neatkarīgi pētnieki, *Albert Fert* un *Peter Grunberg* 1988. gadā atklāja, ka ir iespējams iegūt, labākus parametrus pielietojot, vairākus slāņus ar dažādiem materiāliem. Šis darbs magnetoresistoru sfērā abiem pētniekiem ļāva saņemt Nobela prēmiju 2007. gadā. [17]

Ir divi veidi, kā var būt uzbūvēti GMR sensori: *Current in plane* CIP (strāva plaknē) un *Current perpendicular to plane* CPP (strāva perpendikulāri plaknei). Atkarībā no elektrodu novietojuma un materiālu salikuma. Strāvas ceļš var doties pa vienu materiālu vai arī šķērsot vairāku materiālu robežas, šķērsojot vairākas materiālu robežas, būs lielāka lādiņu atšķirība starp elektrodiem un lielāka materiāla pretestības izmaiņa pie vieniem un tiem pašiem ārējiem apstākļiem.



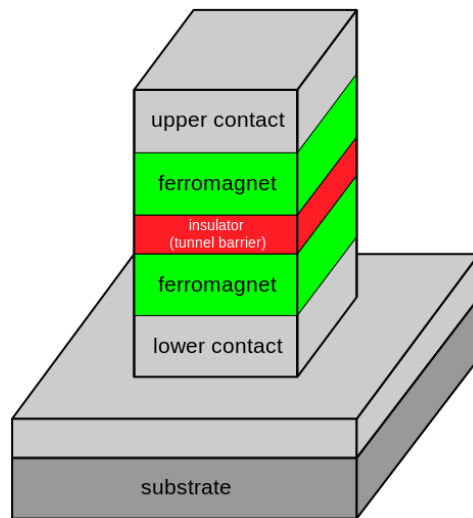
1.2.3.att. CIP un CPP struktūra

Izmantojot šo pašu struktūru vēl joprojām tiek atklāti jauni veidi, kā palielināt pretestības izmaiņu sensoros. Jo, iegūstot lielāku pretestības izmaiņu, var iegūt jutīgākus sensorus, kurus var pielietot jaunās fizikas izpētes sfērās. Šo un vispār visu magnetorezistīvo sensoru darbību var ietekmēt apkārtējā temperatūra.

Pielietojumi GMR sensoriem un tehnoloģijai ir tāda paša, kā AMR. Tikai šim ir lielāka pretestības izmaiņa. Kas var ļaut iegūt lielāku dinamisko diapazonu mērierīcēm, kur pielieto šos sensorus. Magnētiskais RAM jeb MRAM sākumā tika izmantota iegūtā informācija par GMR bet, laukam ejot šo tehnoloģiju šajā pielietojumā aizstāja TMR.

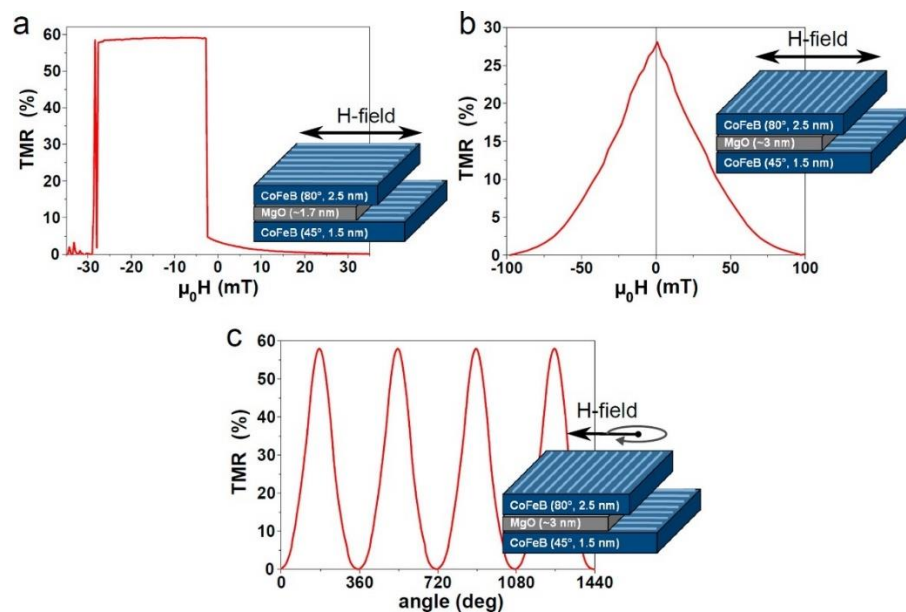
1.2.3 Tuneļa efekta magnetorezistīvie sensori

Ar jaunatklājumiem GMR sensoru darbībā un materiālos tika pavērtas durvis jaunam izpētes virzienam spinu elektronikai. [21] Šī zinātnes daļa jau pietuvojas kvantu fizikai. TMR sensoriem pārejas raksturlīknes mēdz būt daudz asākas un vairāk atgādina slēdžus un nevis precīzus analogus sensorus. Bet tas ir atkarīgs, kādos virzienos ir salikti slāņi ar feromagnētiskiem materiāliem un to tipiem.



1.2.6.att. TMR uzbūve [34]

TMR uzbūve ir samērā vienkārša, starp divām feromagnētiskā slāņiem ir plāna, dažu nanometru bieza izolatora slānis, caur kur pārvietosies elektroni.



1.2.7.att. Viena no TMR tehnoloģiju pielietojums[35]

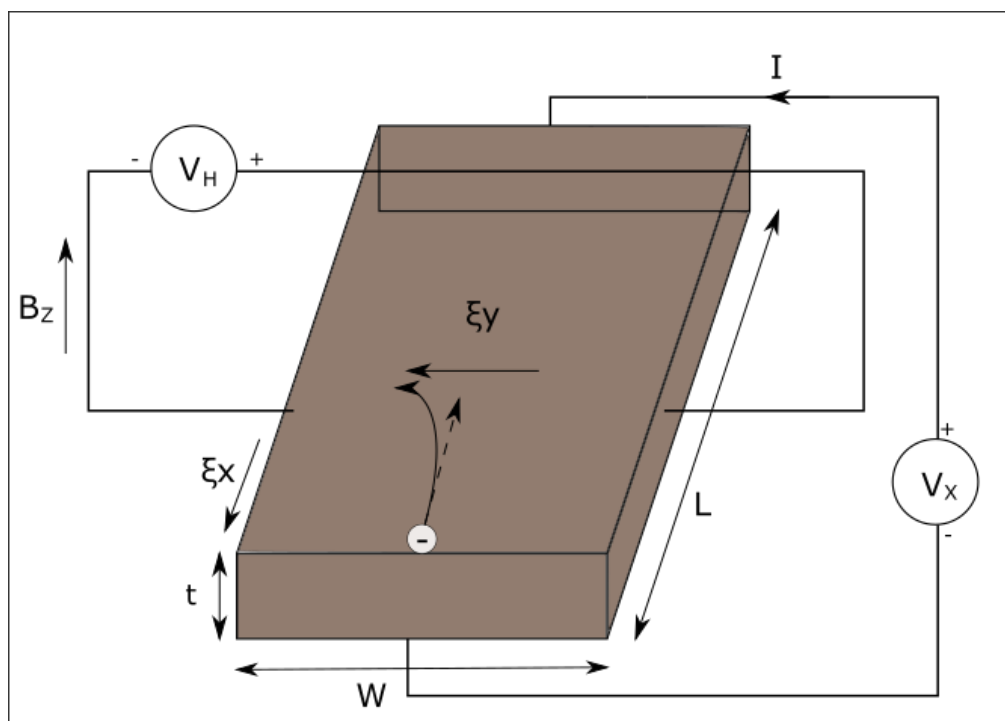
Bet ar vienkāršiem materiāliem iegūst parastu darbību. Izmainot materiālu virzienus, materiālu veidus un materiālu biezumus ir iespējams iegūt atšķirīgas sensoru raksturlīknes. Atkarībā no sensora pielietojuma, piemēram, ir nepieciešams vienkāršs pagriezienu skaitītājs/enkodērs. Var pielietot 1.2.7.att C struktūru, jo tā dod stabilu pretestību rotējošam magnētiskam laukam. 1.2.7.att. B var pielietot strāvas mērījumiem, jo ir izteikt raksturlīkne ar lielu pretestības izmaiņu. 1.2.7.att. A uzbūvi var pielietot, kur nepieciešama ekvivalenta darbība, kā slēdzim, jo ir strauja pretestības izmaiņa pie noteiktām magnētiska lauka vērtībām. [35]

TMR sensori tiek pielietoti strāvas sensoru un pozīciju sensoru ražošanā, paralēli Holla sensoru izmantošanai. TMR pāreja tiek arī pielietota datoru cieto disku lasīšanas galvās. Kā arī TMR ir pamats energoneatkarīgai atmiņai MRAM. Daudzi ražotāji strādā pie šīs atmiņas tipa izstrādes. Jo pēc teorijas ir iespējams sasniegt tādu pašu atmiņas blīvumu un sasniegt pat lielāku rakstīšanas ciklu. Un sakarā ar to ka nav nepieciešami lauk tranzistori atmiņas saglabāšanai un atjaunošanai, teorētiskais enerģijas patēriņš ir zemāks.

1.2.4 Holla sensori

Holla efekts ir sprieguma atšķirības rašanās pāri strāvas vadītājam perpendikulāri pieliktam ārējam strāvas avotam magnētiska lauka ietekmē. Šo efektu atklāja *Edwin Hall* (Edvins Halls) 1879. gadā. Šis atklājums bija balstīts uz teoriju, kuru bija aprakstījis *James Clerk Maxwell* (Džeimss Klārks Maksvels). Maksvels bija tas, kurš sistematizēja visu moderno elektromagnētisma teoriju, kuru apkopoja vairākās daļās starp 1861. un 1863. gadu.

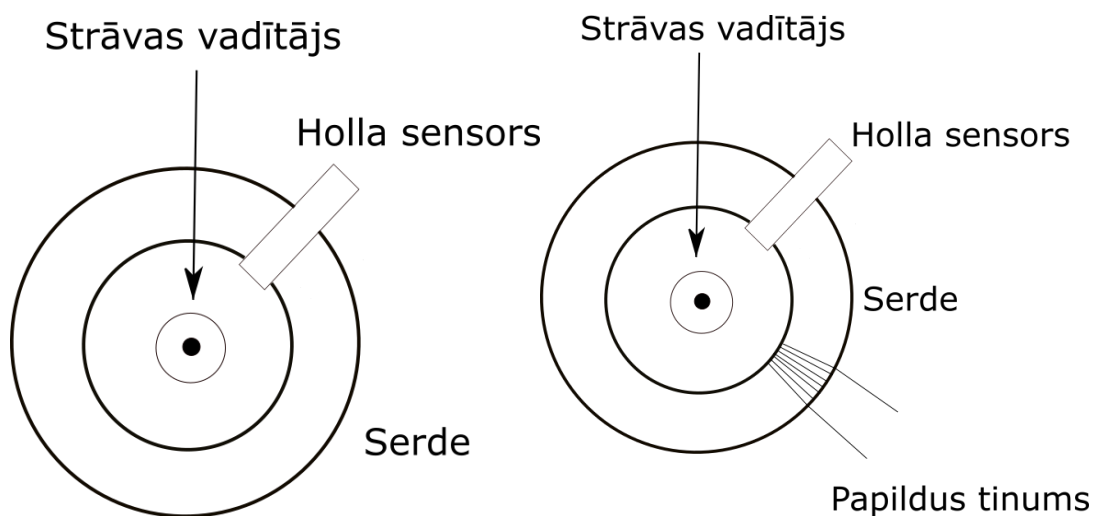
Holla efekts ir novērojams dēļ strāvas uzvedības vadītājos un pusvadītājos. Ārējs magnētiskais lauks uz strāvas lādiņiem iedarbojas ar Lorenca spēku. *Hendrik Lorentz* (Hendriks Lorencs) ir nīderlandiešu fiziķis, kurš arī ir ieguvis Nobela prēmiju fizikā par pētījumiem magnētismā. Lorenca spēks ir elektriskais un magnētiskais spēks uz punktveida lādiņu elektromagnētiskajā laukā. Bez ārēja magnētiskā lauka lādiņi cenšas kustēties vadītājam pa vidu visām sadursmēm ar piejaukumiem. Kad tiek pielikts ārējs magnētiskais lauks, ceļi vairs nav tik taisni un lādiņi sāk uzkrāties uz materiāla malas. Šāda kustība rada pretēja lādiņa ar tādu pašu amplitūdu uz pretējās malas. Un šis potenciāls paliek nemainīgs pie nemainīga magnētiskā lauka un konstantas lādiņu kustības no barošanas avota.



1.2.8.att. Holla sensora iekšējā uzbūve

Brīžos kad strāvu vadošs pusvadītājs, lādiņu nesēji sastopas ar magnētisko indukciju, kas ir vērsta perpendikulāra virzienā pret magnētisko lauku un strāvu. Un viduspunktā uz pusvadītāja materiāla parādās spriegums.

Šāda tipa sensorus mūsdienās pielieto ļoti daudzos un dažādos veidos. Holla sensoru īpašība ir tāda, ka nav nekādu kustīgu un atvērtu detaļu. Bet šo ierīci var protams ietekmēt lielāks ārējs magnētiskais lauks un tas var radīt nepareizu signālu. Protams, šo sensoru vienu pašu, kopā ar vēl ferīta gredzeniem un citiem magnētiskā lauku koncentratoriem pielieto strāvas mērīšanai.



1.2.9.att. Holla sensora pielietošana strāvas mērīšanā [16]

Holla sensorus arī plaši pielieto auto ražošanas nozarē. Holla sensorus var pielietot visādu rotācijas esamības un ātruma mērīšanai. Holla sensorus arī pielieto bezsuku trīs fāžu motoros, šeit viņi noteiktās vietās mēra magnētisko lauku. Un ir spējīgi noteikt kustības virzienu un ātrumu. Ar šādu informāciju motora kontrolieris ir spējīgs efektīvi darbināt motoru, konstanti pierēgulējot vadības parametru. Jo motora vadībai nepieciešamie signāli var atšķirties no tā ka motors ir jau iegriezies un ir jāuztur ap griezieni, vai arī kad motoram ir pielikta liela slodze un ir jāuzsāk rotācija. Holla sensorus piedāvā ļoti liels skaits pasaulē pazīstamu mikroshēmu ražotāji. Piedāvā sākot, no Holla sensoru slēdžiem pozīciju devējiem, kursorsvirām, plūsmu sensoriem, strāvas mērīšanai utt. Pielietojumi patiešām ir ļoti daudzi un dažādi.

1.3 Tirgū pieejamo iekārtu salīdzinājums

1.3.1 AIM TTI I-probe 520

AIM & Thurlby Thandar Instruments ir augstas klases testu un mēriekārtu ražotājs no Kembridžas (Apvienotā Karaliste). Šim ražotājam ir liels klāsts, ar iekārtām sākot no barošanas avotiem beidzot ar spektra analizatoriem. Viena no iekārtām, kuru piedāvā ražotājs, ir bezkontakta strāvas mērtasts, ar kuru ir iespējams mērīt strāvas gandrīz jebkādos vadītājos.



1.3.1.att. Strāvas mērtasta pielietojums darbībā, mēros strāvas oscilogrammas pārveidotājā [27]

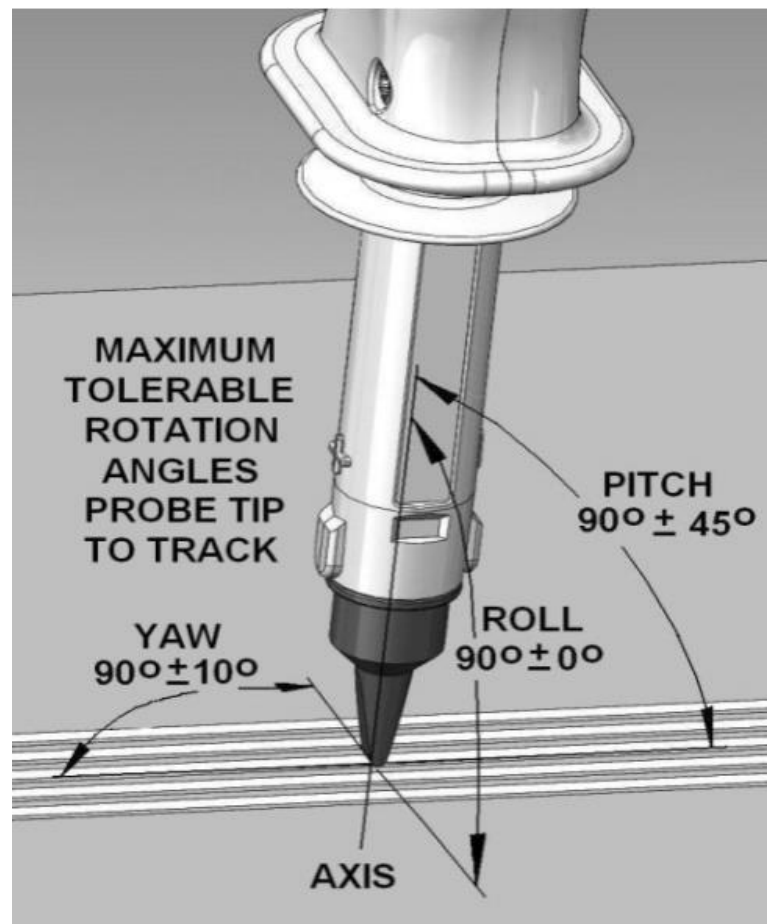
Šis produkts sastāv no divām lielām detaļām mērtasta un signāla apstrādes un vadības bloka.



1.3.2.att. Signāla apstrādes un tausta vadības bloks, mērtasts. [27]

Vadības bloks, kurš ir attēlots 1.3.2.att. pa kreisi ir paredzēts signāla apstrādei un mērtausta vadībai. Ar šo bloku ir iespējams veikt tausta kalibrāciju. Kalibrāciju veic ieliekot mērtaustu caurumā vadības blokā un, pārslēdzot slēdzi, sensors sajūtīs noteiktas strāvas radītu magnētisko lauku, kas plūst pa vadītāju. Ar vadības bloku arī var mainīt oscilogrammas pozīciju, šajā iekārtai regulācijas diapazons ir daudz lielāks nekā osciloskopam, kas var ļaut iegūt pēc iespējas precīzākas oscilogrammas, izmantojot jutīgāku sprieguma (Y) izvērsi.

Mērtaustā, kurš ir attēlots 1.3.2.att pa labi, atrodas magnētiskās zondes magnetometrs, ierosmes ķēde un neliela sensora signāla apstrāde. Šim sensoram tāpat kā citiem ir ļoti svarīga to pozīcija pret strāvas vadītāju, lai to sensoru jutība būtu precīzajā vietā, lai iegūtu maksimāli spēcīgu lauku. Šādas pozīcijas ir attēlotas 1.3.3.att.



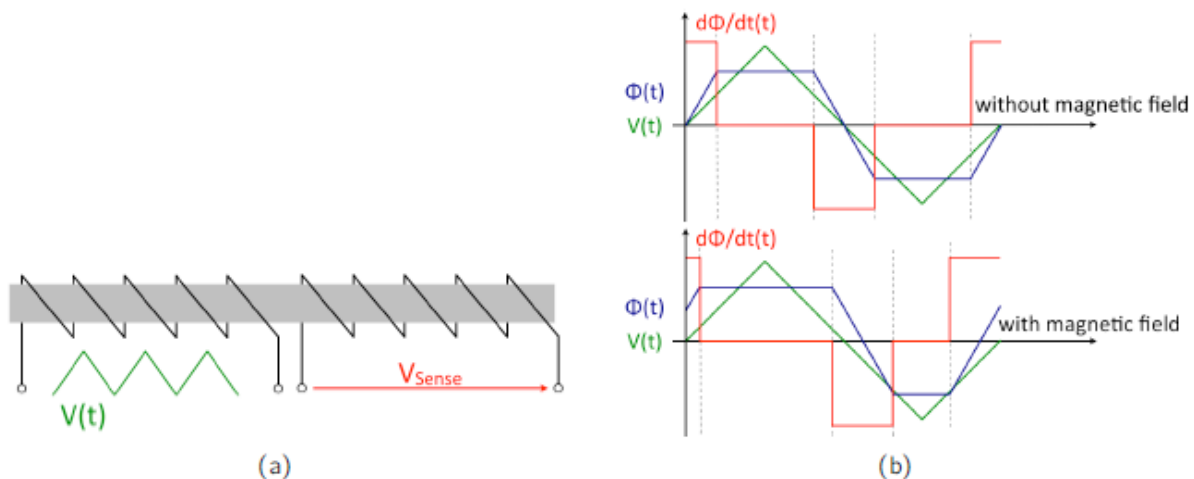
1.3.3.att. Pieļaujamās nobīdes mērtaustam uz vadītājiem.[29]

Ar šo instrumentu var strādāt trīs režīmos: magnētiskā lauka mērījumus, strāvas mērījumus ar gredzenserdi, un strāvas mērījumus uz iespiestās plates celiņiem. Mainot režīmus mainās ierīces parametri, tiek ietekmēti trokšņu parametri, signāla joslas platums un mērāmā lauka lielums un izejošā signāla attiecība pret sajusto lauku. Parametrus vēlāk salīdzinās ar vēl vienu līdzīgu mērierīci, kura būs balstīta uz cita tipa sensora.

Šīs mēriekārtas unikālā lieta, kas spēj viņu padarīt pasaulē unikālu, ir tieši *Fluxgate magnetometer*, kuru ir izstrādājuši, patentējuši un izgatavo Kembridžas universitātes pētnieki. [27] [26]

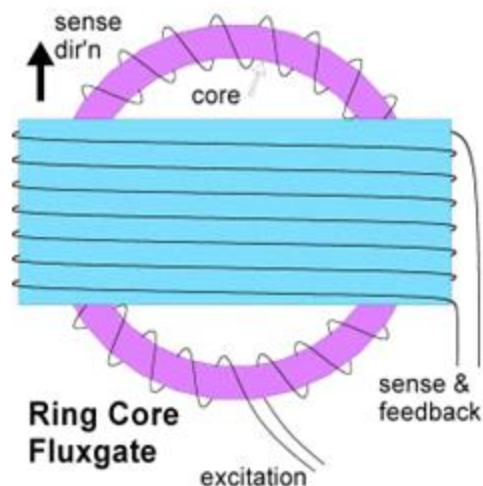


1.3.3.att. Patentētais miniatūrais magnētiskās zondes magnetometrs



1.3.4.att. Magnētiskās zondes magnetometra darbības princips [30]

Zondi veido feromagnētiska materiāla serde 1.3.4.att. (a) ar diviem tinumiem. Ar primāro tinumu serde tiek periodiski piesātināta un atlaista $V(t)$. Izmaiņas sajūt blakus esošais nolases tinums (V_{sense}). Arēja magnētiska lauka ietekmē (1.3.4.att.b) mainīsies serdes magnetizācija, kas izraisīs izmaiņas nolases tinumā inducētajā spriegumā.

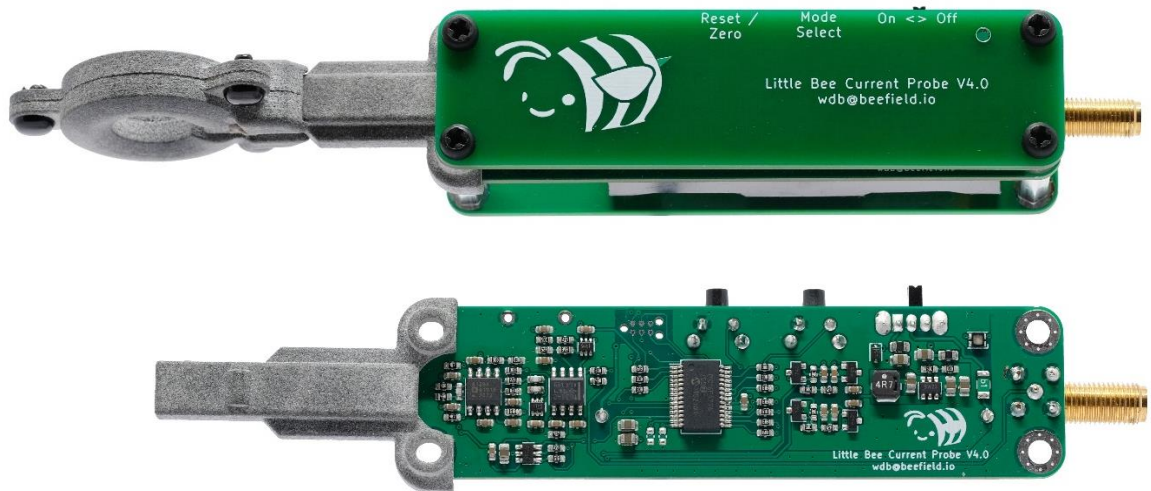


1.3.5.att. Gredzena serdes magnētiskās zondes magnetometra uzbūve[31]

Šāda tipa uzbūve ir tieši Kembridžas izstrādātajā mikro sensorā. Parasti šādi magnētiskās zondes magnetometri bija lielos izmēros un nebija pielietojami šādos pielietojumos. Bet komandas patentētā mikro izgatavotais sensors pielieto planāras izgatavošanas tehnoloģijas, līdzīgi kā pusvadītāju mikroshēmu izgatavošanas procesā. Serde ir izgatavota no nelineāra augstas magnētiskās caurlaidības materiāla uz stikla substrāta, pielietojot īpašu izsmidzināšanas metodi. Serde ir pārklāta ar tinumiem, kuri var būt radīti izmantojot arī planāras tehnoloģijas vai arī ar uztītas ar vadu un mikro manipulatoru palīdzību. Abām tinumu metodēm var būt savas priekšrocības. Sensori ar tinumu var būt kompaktāki bet tinumi, kas ir radīti ar planāro tehnoloģiju var būt daudz precīzāki, jo tie atrodas daudz tuvāk un precīzāk pie serdes. [26] Ar šādu magnētiskās zondes magnetometra sensoru ir iespējams izstrādāt arī daudz lētāku magnētisko mikroskopu, kas ir spējīgs stabili darboties istabas temperatūrā. Nav nepieciešamības pēc dzesēšanas iekārtām, kas palielina šādu iekārtu ražošanas un ekspluatācijas izmaksas. Savienojot šo sensoru, ar īpašu vadības bloku ir iespējams iegūt lineāru izejas signālu lielā uztveramā lauka apgabalā un ar frekvencēm no līdzsprieguma līdz 10MHz.

1.3.2 Little bee

Little Bee B1 ir magnētiska lauka un strāvas tausts, kas pielieto AMR sensoru. Ierīci baro ar vienu 1.5V AA bateriju. Ierīces izeju var pieslēgt pie jebkāda osciloskopa. Uz ierīces ir spiedpogas ar kurām var izvēlēties ierīces režīmu un kalibrāciju. Šo ierīci izstrādāja Stanfordas universitātes Doktorantūras students students, kurš vēlējas sev šāda tipa mērierīce bet nebija spējīgs atļauties tērēt lielu naudas summu, kā par citām industriālām un komerciālām ierīcēm.



1.3.6.att. Little Bee uzbūve un abas koncentratoru iespējas [25]

Mērierīcē ir izmantots HMC1051 AMR sensors un tā darbībai nepieciešamās komponentes, ievērojot ražotāja ieteikumus. Mērot magnētisko lauku, var izmantot parasto koncentratora opciju bez toroīda serdes, novietojot mērierīci perpendikulāri pret mērāmo vadītāju vai komponentu. Un koncentratora garajai malai būtu jābūt paralēli vadītājam, lai izejā būtu pozitīvs signāls.

1.3.3 Iekārtu salīdzinājums

1.3.1 tabula

Komerčiālo un tirgū piedāvāto magnētisko strāvas mērītāju salīdzinājums [25][27]

Iekārta	I-probe 520		Little-Bee B1	
Parametri				
Mērāmas strāvas diapazons, ar toroidālo uzliku	+/-10mA līdz +/- 10A		+/-5A	
Frekvenču diapazons	Max 5MHz, vēl ir 500kHz un 2Hz		Max 10MHz, vēl ir 1MHz	
Jutība mērot uz spiestās plates	1V/A	Ja platums ir no 0.2mm līdz 3.5mm	4A/V	Zemā jutība
	0.5V/A	Ja platums ir no 3mm līdz 6.5mm	1A/V	Augstā jutība
Sensora izolējošā pārklājuma biezums	0.7mm		1mm	
Trokšņu līmenis	DC-5MHz	6mA	DC-10MHz	3mA
	DC-500kHz	3mA	DC-1MHz	2mA
	DC-2Hz	1.5mA		
Maksimālā magnētiskā lauka mērījuma vērtība	+/- 2.5mT (+/-25G)		+/-0.6mT (+/-6G)	
Barošanas avots	Tīkla pārveidotājs, 5.2V		1.5V AA baterija	
Iebūvēta kalibrācijas funkcija	Jā, 0.5mm vadītājs ar AC un DC barošanas avotu		Jā, ir iespējams izmantot iebūvētu sensora reset	
Cena	750 EUR		150 EUR	

2 Projekta izstrāde

Izstrādājamajam mēriekārtām ir jāpilda vienkāršas funkcijas. Lai būtu samērā viegli iespējams notestēt to īpašības un parametrus, un būtu iespēja pārveidot ķēžu darbību ar samērā mazām izmaiņām. Elektriskās ķēdes, iespiedplašu izkārtojumi un iespiedplašu 3d modeļi tika izstrādāti izmantojot KiCad, ir atvērta koda un bezmaksas elektronikas projektēšanas programmatūra.

2.1. tabula

Mēriekārtu parametri

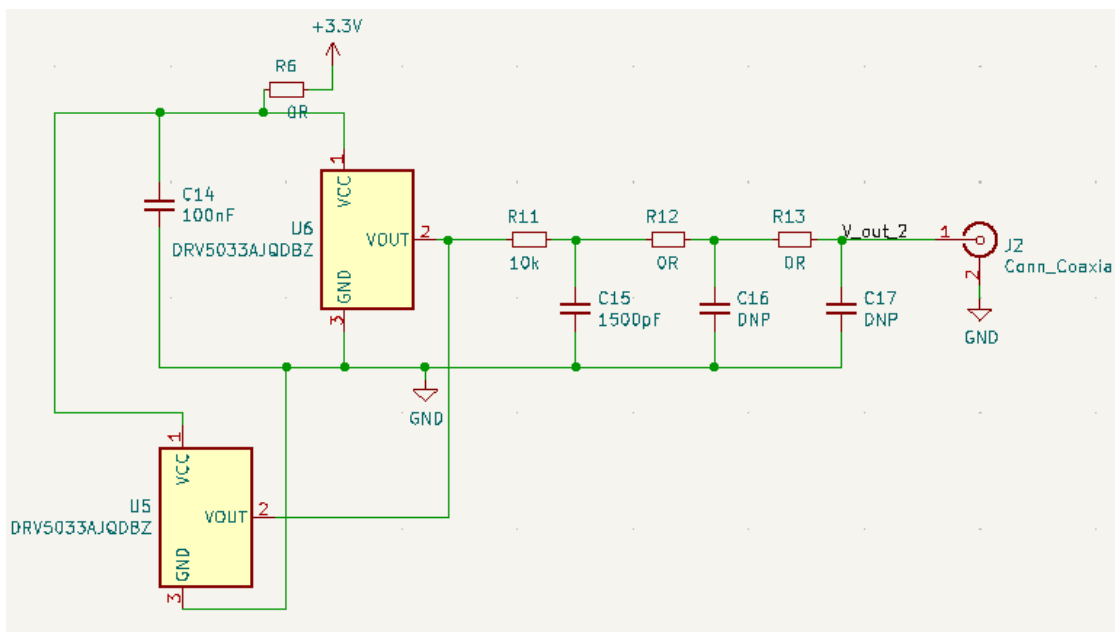
Parametrs	Vērtība	Komentārs
Holla sensors	DRV5053RAQDBZR	+/-18mT
AMR sensors	HMC1051z-rc	+/-0.6mT
Nosakāmas strāvas vērtības	10mA līdz 2A	
Barošanas sprieguma vērtības	5-9VDC	

2.1 Holla sensora balstītās mērierīces izstrāde

Kā galvenais komponents tika izmantots DRV5053RA dēļ tā samēra lielās jutības, pieejamības un zemās cenas.

2.1.1 Principiālās shēmas izstrāde

Par pamatu shēmas izstrādei tika pielietota Texas Instruments izstrādātā datu lapa [14]. Lai šī sensoru plate būtu pielietojuma daudzās situācijās, tika izlemts, ka uz spiestās plates atradīsies tikai sensori, izejas signāla filtri, ienākošās sensoru barošanas konektors ar gaismas diodes indikāciju un izejošā signāla SMA konektoriem. Sakarā ar sensora izteikto virzien darbību. Tika paredzēts, ka iespiedplatei būs divi paralēli kanāli. Katram kanālam ir paredzēti divi dažādi sensoru novietojumi. Sensori uz plates tiks izvietoti ar 90 grādu nobīdi. Šādi var iegūt mērījumus uz diviem sensoriem vienlaicīgi, lai varētu salīdzināt sensora novietojumu pret strāvas vadītāju nomērot abus sensoru vienā laikā, jo precīzi atdarināt eksperimentu vairākas reizes ar man pieejošajām iekārtām nav iespējams. Trūkums šādai minimālu funkciju iespiedplatei samērā maza jutība - vien 45mV/1mT. Tādēļ var būt nepieciešamība izmantot signāla pastiprinātāju.



2.1.1.att. Principiālā shēma

Sensors DRV5053RA ir mikroskāma ar iebūvētu Holla sensoru un pastiprinātāju. Šis integrētais sensors izejā izdod lineāru izejas sprieguma attiecībā pret apkārtējo magnētisko lauku. Sensoram ir arī laba jutība visā darbības temperatūras diapazonā ar garantēto precizitāti +/-10% [14].

Ir arī paredzētas opcijas priekš RC filtriem pie sensora izejas. Tos ir iespējams pilnībā izslēgt, izmantojot 0Ω vērtības uz R11, R12 un R13 pozīcijām. Priekš pirmā testa tika atstāta ieteiktā vērtība no ražotāja dokumentācijas:

(2.1)

$$F_c = \frac{1}{2 * \pi * R11 * C11}$$

Kur F_c – Filtra nogriešanas frekvence ap -3db, Hz;

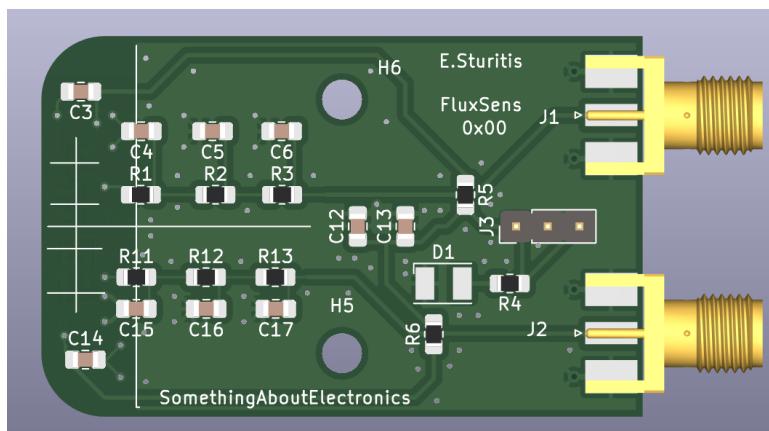
$R11$ – rezistora pretestība, Oms;

$C11$ – kondensatora kapacitāte, F.

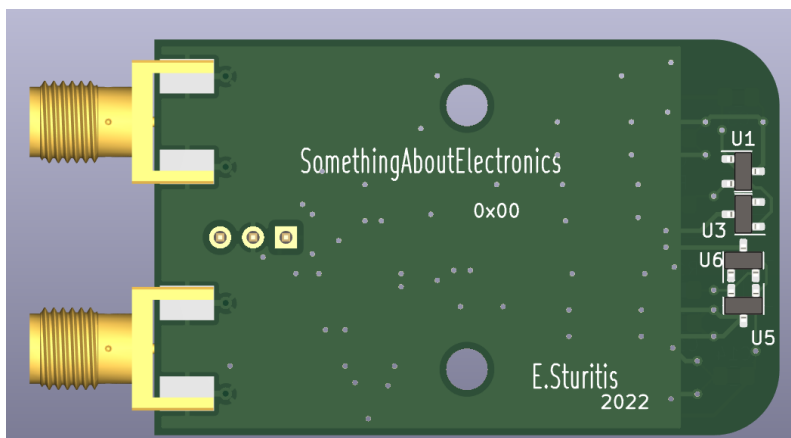
Izmantojot izvēlētas vērtības iegūstam nogriešanas frekvenci 10.6kHz, kas ir vairāk nekā pietiekami, jo mērierīce ir paredzēta tikai DC strāvas mērīšanai. Un ja ir nepieciešams samazināt frekvenču joslu paaugstināt par kārtu. Izvēloties 1.5uF nogriešanas frekvence ir jau 10.6Hz. Bet, samazinot joslu, tiek pazaudēta iespēja redzēt īsus impulsus un ātras signāla izmaiņas.

2.1.2 Iespīestās plates izklājums

Sakarā ar to, ka bija vēlme uz iespīestās plates likt divus kanālus ar šiem sensoriem, tad arī izklājums ir gandrīz spoguļskatā. Šajā gadījumā tikai ienākošās barošanas atsaistošie kondensatori paliek plates vidū un barošanas indikācijas diode ar paliek tikai viena.



2.1.2.att. Iespīestās plates augšējais slānis



2.1.3.att. Iespīestās plates apakšējais slānis

Veicot montāžu vienai, spīestajai platei būs tikai uzlodēts U5 un U1 Holla sensors, un otrai būs uzlodēti tikai U3 un U6. Ar šādu konfigurāciju var mēģināt redzēt izejas sprieguma izmaiņu atkarībā no sensora leņķa pret magnētiskā lauka kustības virzienu.

R6 un R5 ir paredzēti, kā tiltiņi izmantojot nulle omu pretestības, lai būtu opcijas izslēgt atsevišķu sensoru no barošanas. C12 un C13 ir ieejas barošanas atsaistošie kondensatori ar 100nF un 2.2uF vērtībām. Lai redzētu barošanas avota stāvokli, ieslēgts vai izslēgts, uz mērierīci ir uzlikta gaismas diode. D1 gaismas diodei virknē ir ieslēgta strāvas ierobežojoša pretestība R4

(2.2)

$$R4 = \frac{U_B - V_F}{I_f}$$

Kur $R4$ – strāvu ierobežojošās rezistora pretestība, Ω ;

U_B – mēriekārtas barošanas spriegums, V;

V_f – sprieguma kritums uz diodi, V;

I_f – diodes nominālā strāva, A.

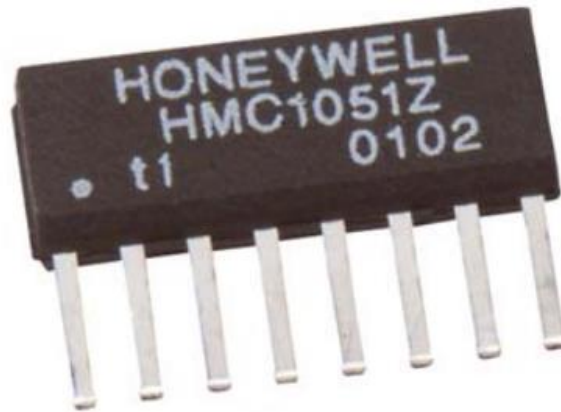
Pieņemot, ka sensoru var barot no 2,5V līdz pat 38V. Bet esam izstrādes laikā nevēlamies pārsniegt 9V. Pie 3,3V barošanas spriegumu, būtu jāizvēlas 130Ω pretestību un pie 9V barošanas sprieguma būtu jāizvēlas 700Ω liela pretestība. Tā kā tika, ielikta 750Ω liela pretestība.

2.2 AMR sensora balstītās mērierīces izstrāde

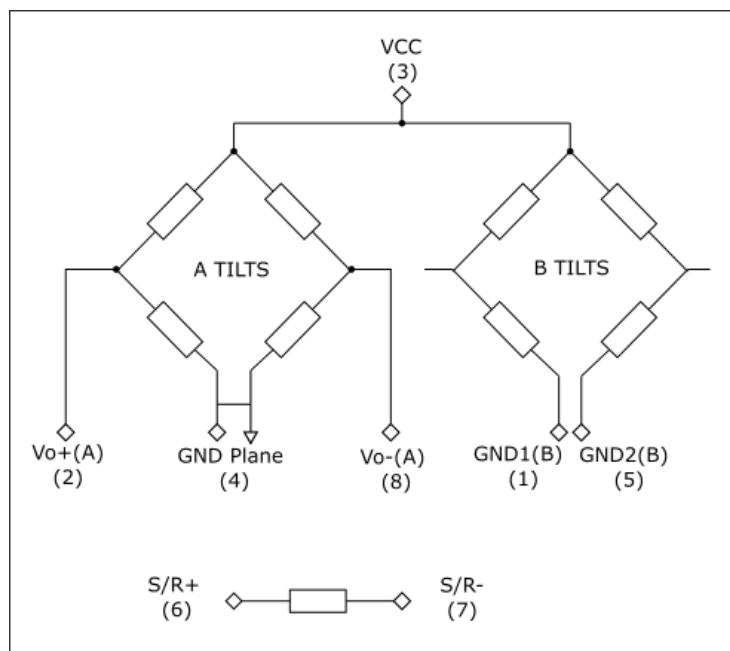
Tika izvēlēts Honeywell ražots HMC1051z-rc anizotropās magnetopretestības sensors. Šis sensors ir radīts, kā daļa no sensoru saimes vāja magnētiskā lauka mērījumiem. Šie sensori ir paredzēti ļoti jutīgiem magnētiska lauka, virziena un amplitūdas mērījumiem. Sensora uzbūvē ir paredzēti divi mērtilti. Šajā sensoru saimē ir arī pieejami ar nobīdes saiti, bet tieši šajā versijā šī funkcija nav implementēta.

Magneto pretestības sensors ir radīts, uz silīcija substrāta uzklājot niķeļa dzelzs plānu pārklājumu. Kurš ir uzklāts noteiktā formā, lai iegūtu rezistīvu elementu. Magnētiskā lauka ietekmē notiek izmaiņas rezistīvajos tilta elementos, kas rada sprieguma izmaiņas uz mērtilta izeju. Šie rezistīvie elementi ir nolikti kopā un ir kopīga jutības ass, kas rada pozitīvu sprieguma izmaiņu, ja magnētiskais lauks pieaug jutības ass virzienā. Dēļ vienas ass jutības var noteikt tikai magnētiskā lauka lielumu un ne atrašanos telpā.

Caur S/R saiti laistās strāvas magnētiskais lauks veic kalibrācijas/ nonullēšanas funkciju sensora iekšienē, noorientējot magnētiskos domēnus vienā virzienā. Tas ļauj sensoram veikt augstas jutības mērījumus, var nomainīt mērtilta izejas sprieguma polaritāti un periodiski izmantojot var uzlabot linearitāti, samazina šķēršu magnētisko lauku ietekmi un arī temperatūras efektus.



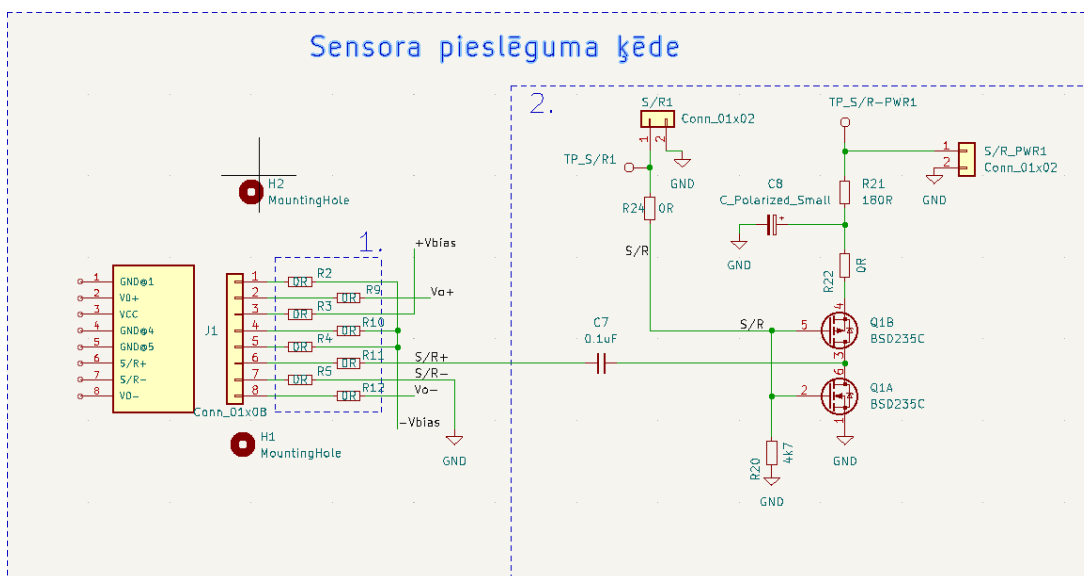
2.2.1.att. Sensora ārējais izskats [10]



2.2.2.att. AMR sensora iekšējais slēgums [10]

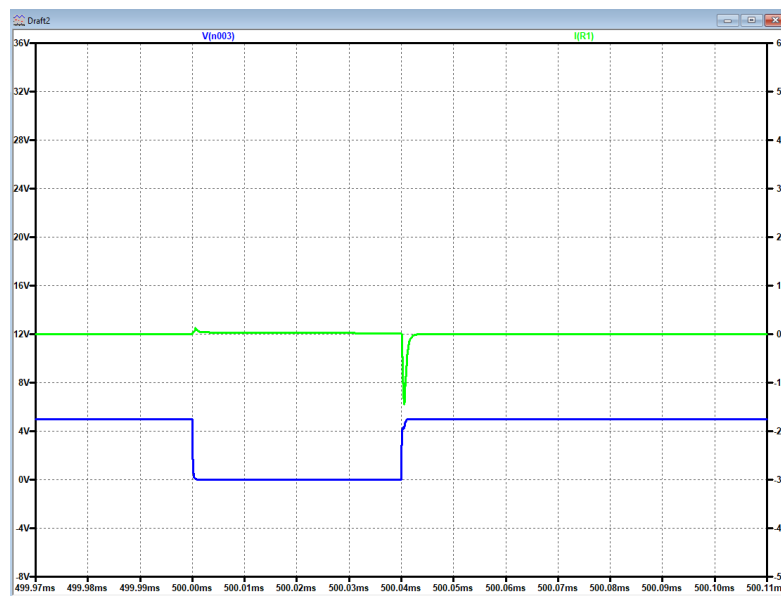
2.2.1 Principiālās shēmas izstrāde

Izstrādājot shēmu, bija jāparedz iespēja modificēt sensora pieslēgumu, tādēļ tikai izvēlēts katru sensora izvadu pieslēgt caur 0Ω pretestību (3.2.3.att. 1 punkts). Sensoru būs iespējams ievietot konektorā vai arī ielodēt platē kādā noteiktā pozīcijā. Šeit ir arī ķēdes daļa priekš S/R saites.



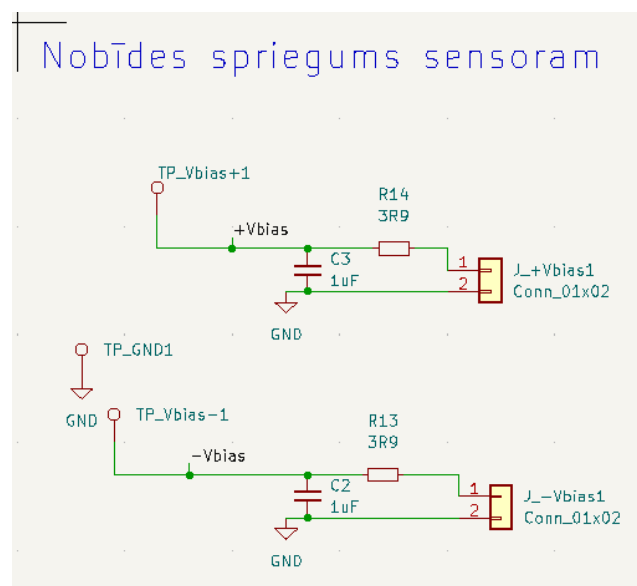
2.2.3.att. Sensora un S/R ķēde

S/R saite ir paredzēta sensora kalibrācijas / nonullēšanas funkcijai, kas ir svarīga, lai samazinātu ārējo lauku ietekmi uz sensoru un mērījumiem. S/R ir iebūvēta sensora iepakojumā kā metāliska spirāle, kas ir saistīta ar sensora jutības asi. Parasti pretestība ir 3Ω līdz 6Ω . Un parastos apstākļos nepieciešams kā minimums 400mA pīķa strāva darbībai. *Set* (uzstādīt) impulss ir definēts kā pozitīvs strāvas impulss, kas ieiet S/R+ izvadā. Rezultatīvs uzstādīšanas impulss, novietotu magnētiskos domenus uz priekšu, kas radītu pozitīvu izejas raksturlīkni pāri mērtiltam.



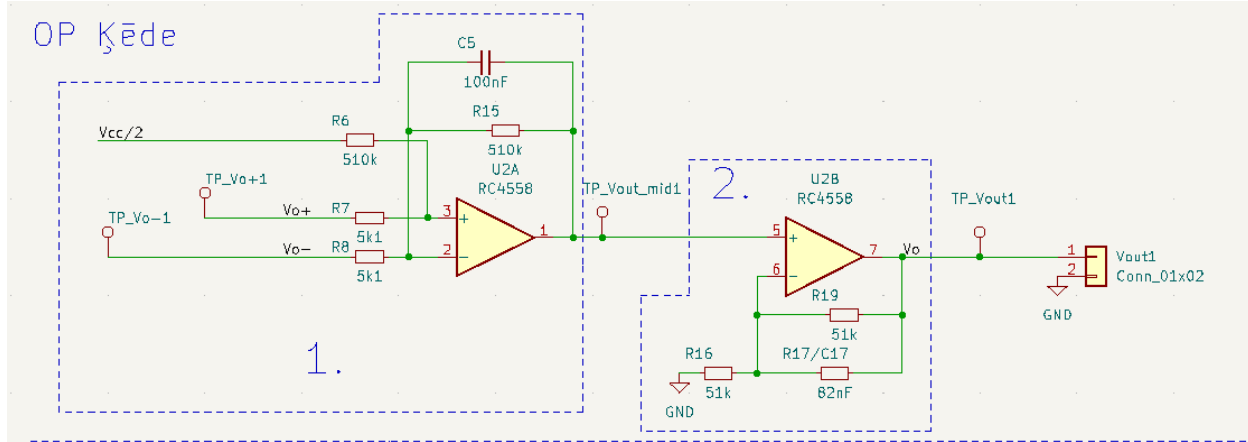
2.2.4.att. Simulētā strāvas raksturlīkne uz S/R tinumu.

Pie shēmā norādītajiem parametriem ir novērojams šāda raksturlīne. Izstrādes gaitā būs eksperimentāli jāatrod optimālos komponentu nominālus un tranzistoru īpašības.



2.2.5.att. Nobīdes ķēde sensora mērtilta barošanai

Mērtilta V_{cc} un GND jeb V_{bias+} un V_{bias-} . Veicot citu izstrādājumu apskatu, šāds pieslēgums bija novērojams vairākiem izstrādātiem projektiem un zinātniskajiem rakstiem. Šis būtu parocīgs gadījumos, ja būtu pieejams bipolārs barošanas avots uz mērierīces, kas šajā gadījumā nebija.



2.2.6.att.Operacionālā pastiprinātāja ķēde

Pirmā ķēdes daļa. UZ RC4558 ir izveidots diferences pastiprinātājs.

(2.3)

$$V_{out_mid} = \left(\frac{R_6}{R_7 + R_6} \right) * \left(1 + \frac{R_{15}}{R_8} \right) * V_{O+} + \left(\frac{R_7}{R_6 + R_7} \right) * \left(1 + \frac{R_{15}}{R_8} \right) * V_{cc/2} + \frac{R_{15}}{R_8} V_{O-}$$

Kur R_x – ķēdes rezistoru pretestība, Ω ;

$U_{cc/2}$ – Šeit tiek pieņemts, ka mērtilts tiek darbināts no kopējās mēriekārtas darbības sprieguma, V;

V_{O+} , V_{O-} – Sprieguma izejas no mērtilta, V;

Ja $R_6 = R_{15}$ un $R_7 = R_8$ tad varam vienkāršot 2.3 formulu un iegūsim 2.4:

(2.4)

$$V_{out_mid} = \frac{R_{15}}{R_8} (V_{O+} - V_{O-}) + V_{cc/2}$$

(2.5)

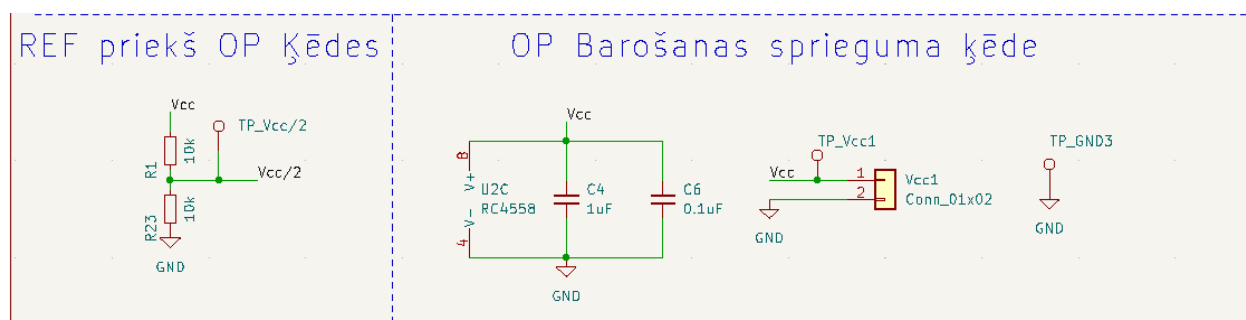
$$F_c = \frac{1}{2 * \pi * R15 * C5}$$

Kur F_c – filtra nogriešanas frekvence ap -3db, Hz;

$R15$ – rezistora pretestības, Ω ;

$C5$ – kondensatora kapacitāte, F.

Aprēķinot izveidotā filtra caurlaides frekvences, robeža ir 3,12Hz.



2.2.7.att. Atbalsta spriegums priekš operacionālā pastiprinātāja un barošanas atsaistīšanas kondensatori

References spriegums ir nepieciešams operacionālā pastiprinātāja darbībai. Šo spriegumu ir nepieciešams veidot no kopējā mērtilta barošanas sprieguma un ir jābūt 0.5 no V_{cc} . Šis ir izdarāms pielietojot pretestības dalītāju, un var aprēķināt izmantojot (2.6) formulu:

(2.6)

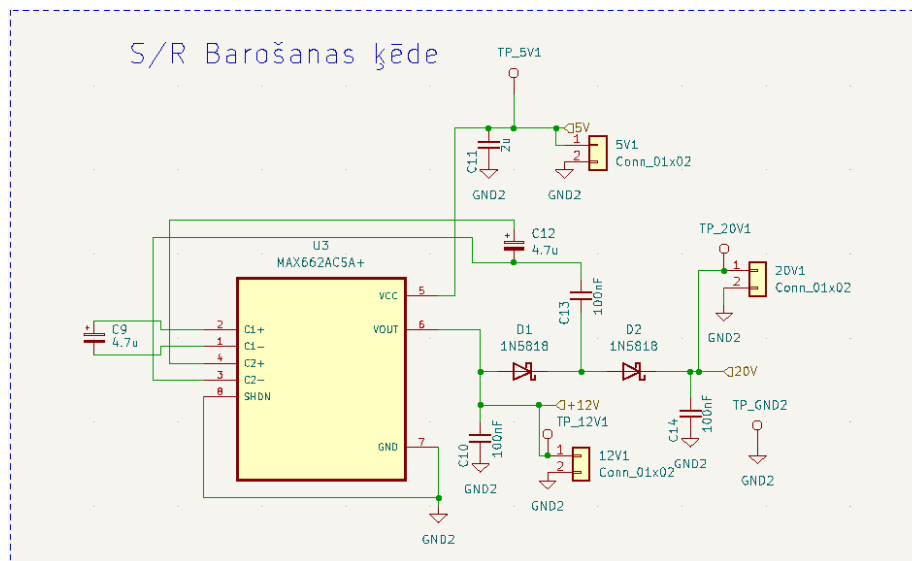
$$V_{cc/2} = \frac{R23}{R1 + R23} * V_{cc}$$

Kur $V_{cc/2}$ – Dalītāja izejas spriegums, V;

$R23$ – dalītāja apakšējā rezistora pretestība, Ω ;

$R1$ – dalītāja augšējā rezistora pretestība, Ω ;

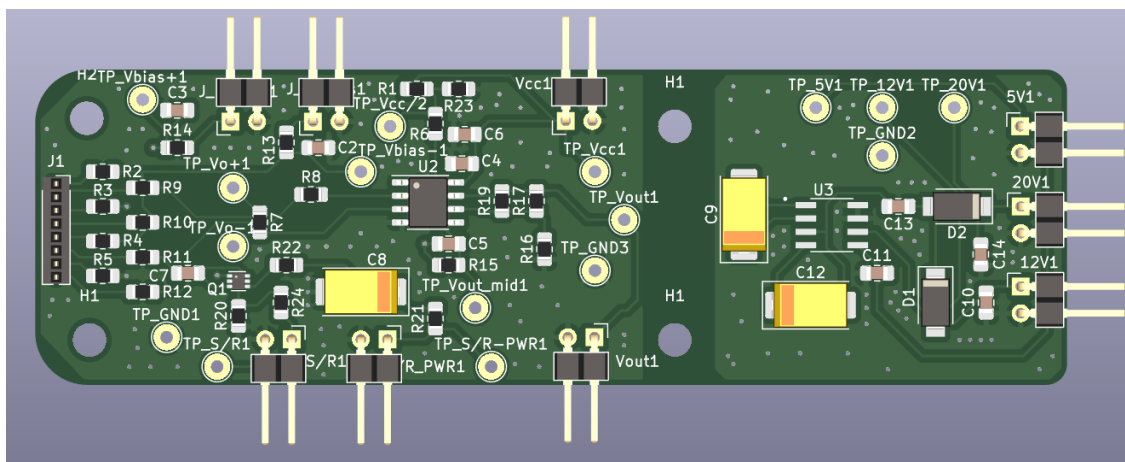
V_{cc} – mērierīces barošanas spriegums, V.



2.2.8.att. Set/Reset barošanas ķēdes daļa [12]

Honeywell HMC1051 rāzotāja dokumentācija ir aprakstīta, šādu ķēžu izstrādes princips, kur sekoju līdzi paraugam un sagatavoju ķēdi priekš barošanas avota, kuru varētu izmantot set/reset tinuma darbībai. Bet šis netika uzmontēts uz spiestās plates, jo nebija pieejami komponenti pasūtīšanas mirklī.

2.2.2 Iespīstās plates izklājums



2.2.9.att. Iespīstās plates augšēja slāņa izkārtojums

Mērierīces iespiedplate tika izveidota tā, lai AMR sensors atrastos pašas mērierīces malā, kas ļautu novietot sensoru dažādās pozīcijās. Iespiedplates kreisajā malā ir visi komponenti saistībā ar pašu mērierīci. Labajā malā ir S/R signāla paaugstinošais barošanas avots.

3 Eksperimenti

3.1 DRV5053 mērierīces pārbaude un eksperimenti

3.1.1 Sensoru izejas sprieguma attiecība pret vadītāja platumu un strāvu

Tehniskais pamatojums:

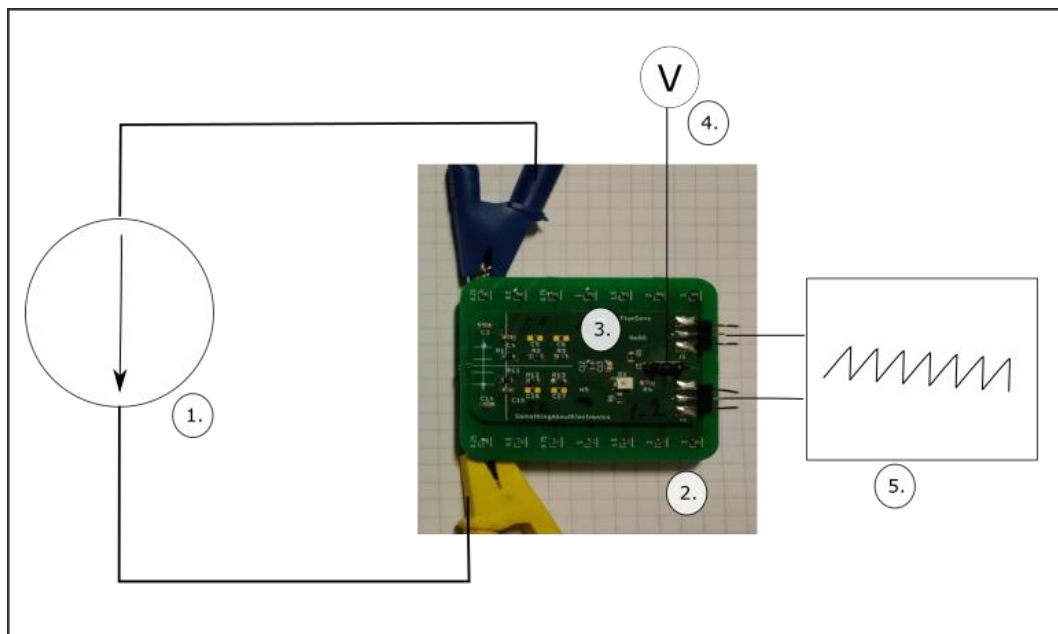
Pārbaudīt Holla sensoru mērierīces darbību mērot magnētisko indukciju, kuru rada uz iespiedplates uztrasēti celiņi dažādos platumos.

3.1. tabula

Iekārtu un ekipējuma saraksts:

Nr.p.k.	Apraksts	Komentārs
1	Barošanas avots mērāmajai ķēdei	RD6018
2	Strāvas vadītāja plate	
3	Mērierīce	DRV5053
4	Barošanas avots, mērierīcī	5V laboratorijas barošanas avots
5	Osciloskops	Rhode & Schwarz RTB2004

Eksperimenta ķēdes slēgums



3.1.1.att. Eksperimenta pielietotais slēgums

Eksperimenta gaita:

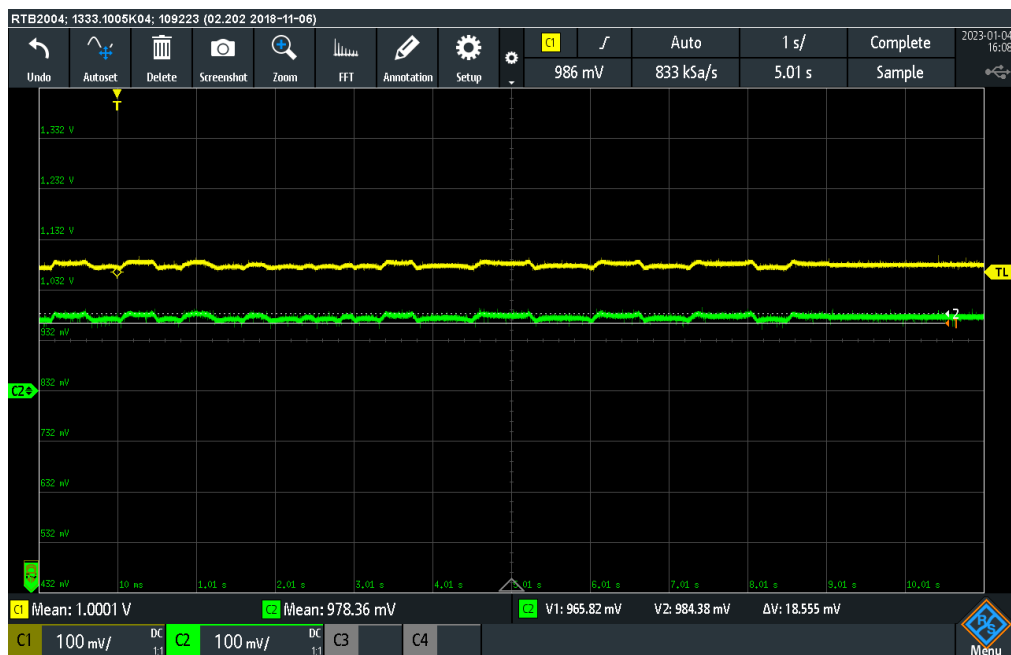
Tika izveidos augstāk parādītais slēgums. Veicot pirmos mērījumus, tika meklētas mērāmās strāvas robežās, pie kuras būtu, iespējams iegūt samērā precīzus un pareizus datus. Šā eksperimenta gaitā pieņemu veikt mērījumus starp 0.7A un 1A. Uztādot barošanas avotā mērāmo strāvas vērtību. Kā mēriekārtas barošanas avotu var izvēlēties 9V bateriju, kas var dot tīru barošanas avotu bez trokšņiem. Osciloskopa diviem kanāliem uzstādot uz 100mV/iedaļu vertikālo izvērsi un 1s/iedaļu horizontālajā iedaļā. Varēja sākt veikt mērījumus. Mērierīci kustinot paralēli strāvas vadītāja iespaidplatei, tiek meklētas izejas signāla izmaiņas. Tādēļ visās oscilogrammās ir redzams pulsējošs signāls. Šādi varēja meklēt vidējo izmaiņu signālam. Šo vērtību nolasīja no osciloskopa ekrāna izmantojot iebūvēto kursora funkciju. Pie izvēlētajām strāvas vērtībām tika piefiksēti rezultāti un arī ierakstītas oscilogrammas. Lai vizuāli parādītu šo eksperimentu tehniskos ierobežojumus. Tika izvēlēti trīs vadītāju platumi 0.25mm, 1mm un 2mm.



3.1.2.att. Pirmā mērierīce, vadītāja platums 0.25mm un strāva 1A



3.1.3.att. Otrā mērierīce vadītāja platums 1mm un strāva 1A



3.1.4.att.Otrā mērierīce, vadītāja platums 2mm un strāva 1A

Apskatot augstāk esošās oscilogrammas. Var redzēt tādu, kā oscilējošu taisnstūra veida signālu. Šo darbību veicu es ar sensora pārvietošanu pāri vadītājam atkārtoti, lai novērotu mērierīces darbību. Signāla izmaiņa ir ļoti ātra, sensora signāla izejas frekvenču josla ir 20kHz, ar izejā esošo filtru ierobežojam darbību līdz 10.6kHz.

Mērījumu tabula:

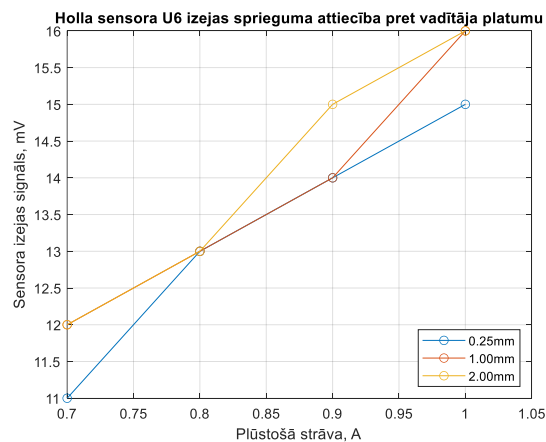
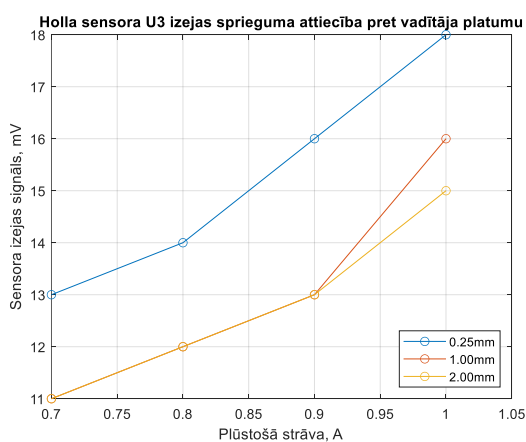
3.2. tabula

Eksperimentā iegūtie rezultāti

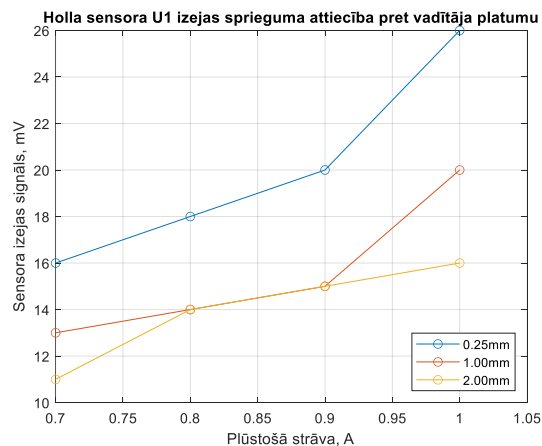
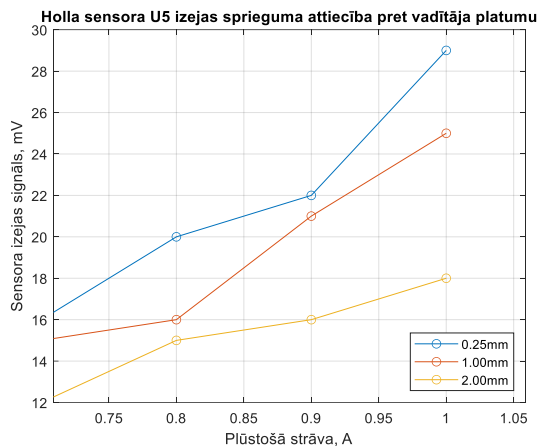
Vadītāja platums, mm	Strāva, A	V_S1_1(U3), mV	V_S1_2(U6), mV	V_S2_1 (U1) , mV	V_S2_2 (U5), mV
0.25	0.7	13	11	16	16
	0.8	14	13	18	20
	0.9	16	14	20	22
	1.0	18	15	26	29
1	0.7	11	12	13	15
	0.8	12	12	14	16
	0.9	13	14	15	21
	1.0	16	16	20	25
2	0.7	11	12	11	12
	0.8	12	13	14	15
	0.9	13	15	15	16
	1.0	15	16	16	18

Rezultāti:

Pēc mērījumiem ir novērojams, ka pie mazāka vadītāja platuma sensora izejā ir lielāks spriegums kas, atbalsta par pieņēmumu, ka pie mazāka vadītāj šķērsriezuma laukuma būs lielāks strāvas blīvums un lielāks magnētiskais lauks.



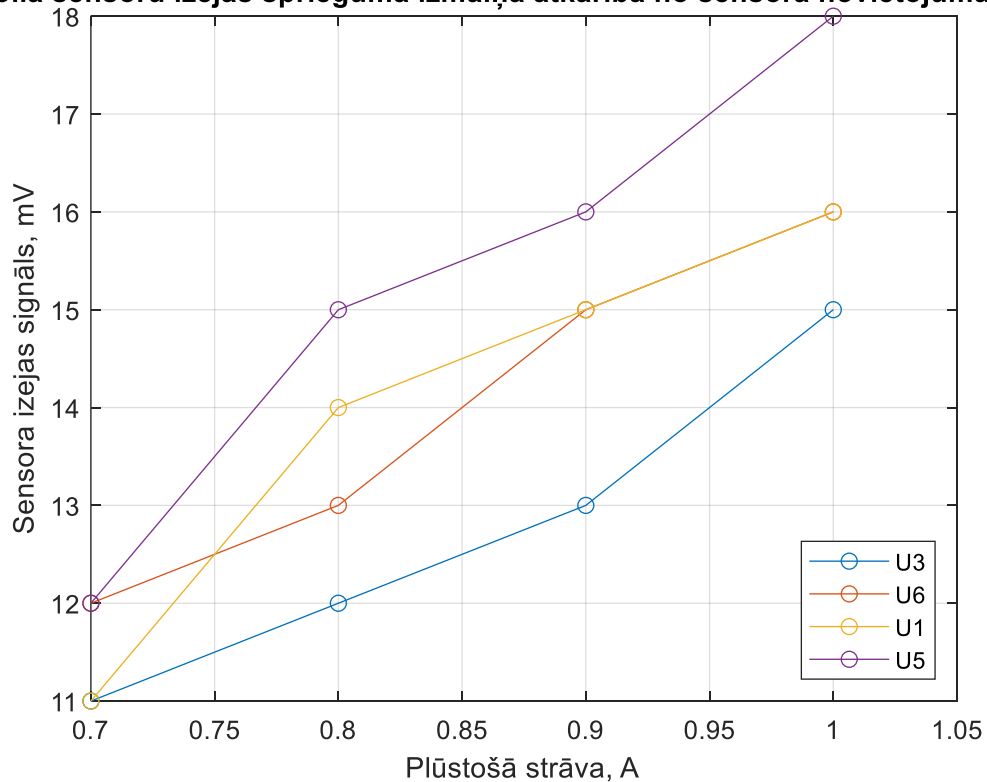
3.1.5.att. Pirmā mērierīces darbība ar 180° U3 un 270° U6 sensoru novietojumu



3.1.6.att. Otrās mērierīces darbība ar 90° U5 un 0° U1 sensoru novietojumu

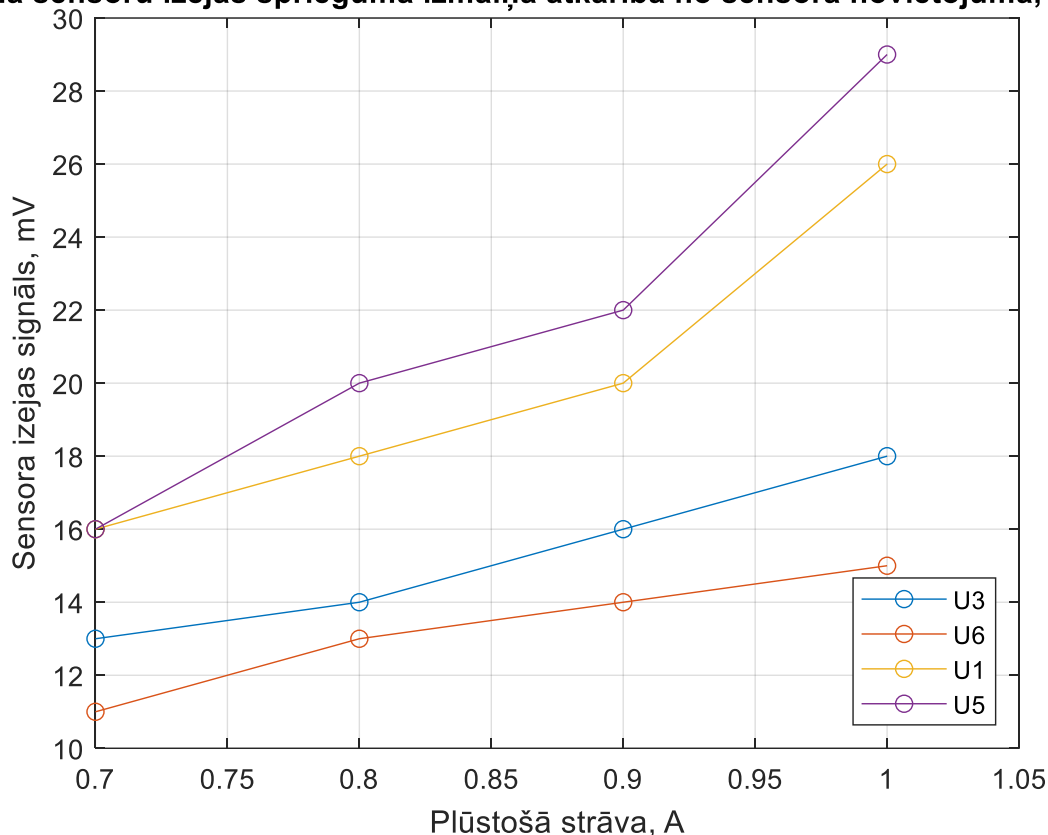
Apskatot šos rezultātus, ir novērojams, ka pie lielāka vadītāja platuma izmaiņas signālā ir mazākas. Un ir grūti novērojams ar esošo mērījumu metodiku. Ir novērojama lineāra izejas signāla atkarība no vadītājā plūstošās strāvas.

Holla sensoru izejas sprieguma izmaiņa atkarība no sensora novietojuma, 2mm



3.1.7. att. Sensora izejas spriegumu salīdzinājums Pie 2mm vadītāja platuma

Holla sensoru izejas sprieguma izmaiņa atkarība no sensora novietojuma, 0.25mm



3.1.8.att. Sensora izejas spriegumu salīdzinājums Pie 0.25mm vadītāja platumā

Apskatot sensoru izejas signālus, pie vienāda vadītāja platuma un strāvas vērtībām ir redzamas nobīdes. Piemēram otrā mērītāja izejas ir ievērojami lielākas nekā pirmās mērierīkstas izejā. Tas varētu būt izskaidrojams ar ietekmi mērījumu gaitā, strāvas vadītāja un mērierīce nebija paralēli. Sensoru attālums vien no otra ar varētu ietekmēt viņu darbību, jo U3 un U6 ir pavisam tuvu viens otram un U1 un U5 atrodas vien no otra aptuveni 10mm attālumā.

Secinājumi:

Veicot mērījumus ar Holla sensora mērierīci, bija novērojams, ka tai ir straujākas signāla izmaiņas, kad tas tiek pārvietots pāri vadītājam. Šis ir izskaidrojams ar to, ka pats Holla sensors atrodas iepakojuma vidū un no plates virsmas atrodas mazāk nekā 0,5mm viens no otra. Ir novērojama lineāra atkarība no vadītāja plūstošās strāvas un sensora izejas signāla izmaiņas vērtības, kas bija gaidāms. Kā arī pēc mērījumiem varētu secināt, ka ir atšķirība starp sensoru pagriezienu leņķi, bet šo nevaru apstiprināt, jo ir veikti pārāk maz mērījumi. Lai pārliecinātos par šo ietekmi, būtu jāveic mērījumi ar vienu sensoru kuru būtu spējīgi precīzi rotēt virs strāvas vadītāja un tad varētu uzņemt precīzi sensora novietojuma ietekmi uz izejas signāla vērtībām.

3.2 HMC1051 mērierīces pārbaude un eksperimenti

3.2.1 Ierīces darbības pārbaude

Tehniskais pamatojums:

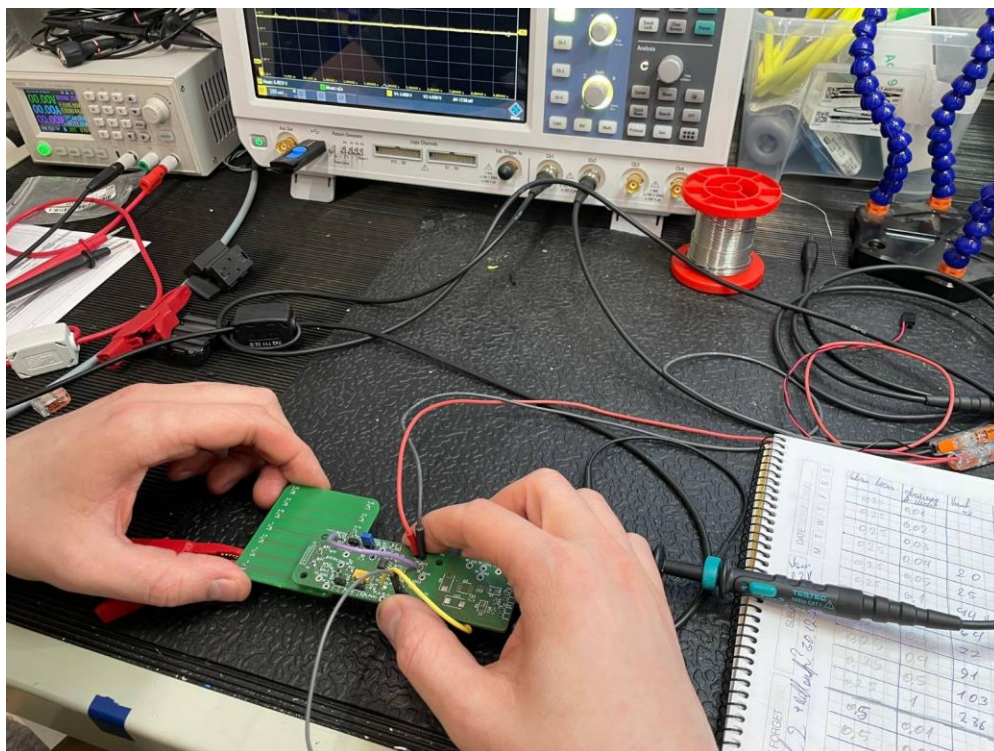
Pārbaudīt AMR sensora mērītāja darbību, mērot magnētisko indukciju, kuru rada uz iespaidplates uztrasētais vadītājs 1mm platuma un strāvas diapazonā no 0.2A līdz 2A. Šādi pārbaudot ierīces darbību.

3.3. tabula

Iekārtu un ekipējuma saraksts:

Apraksts	
AMR Sensoru mēriekārta	
Strāvas vadītāja iespaidplate	
Barošanas avots, sensoram	5V Laboratorijas barošanas avots
Barošanas avots magnētiskajam laukam	RD6018
Osciloskops	Rhode & Schwarz RTB2004

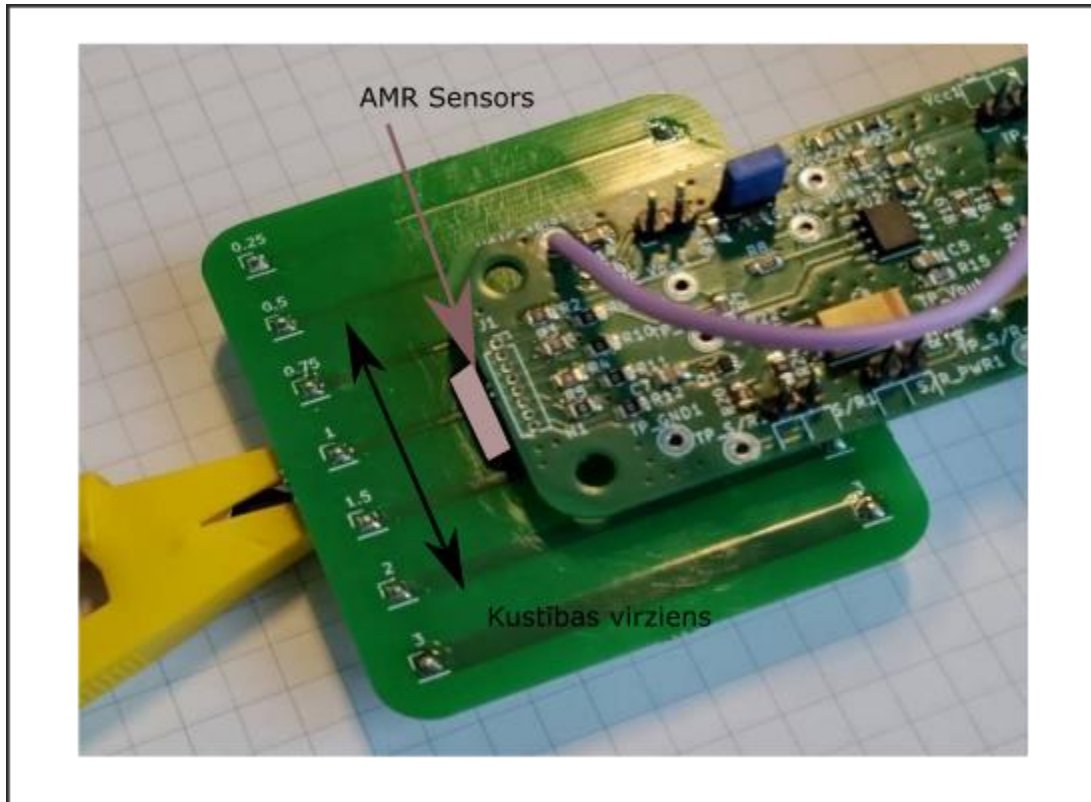
Eksperimenta ķēdes slēgums



3.2.1.att. Iekārtas pārbaude

Eksperimenta gaita:

Saslēdzot iepriekš parādīto 3.2.1.att. Uz barošanas avota uzstādot konstantas strāvas vērtību diapazonā no 2A līdz 200mA. Uzņemot raksturlīknes ar kurā sensors tiek virzīts pāri vadītājam, lai iegūtu lielāko sprieguma izmaiņu. Un no šīs sprieguma izmaiņas var veikt mērījumus ar osciloskopa kursora funkciju un iegūt izejošos sensora spriegumu pie dotās strāvas vērtības un celiņa platuma.

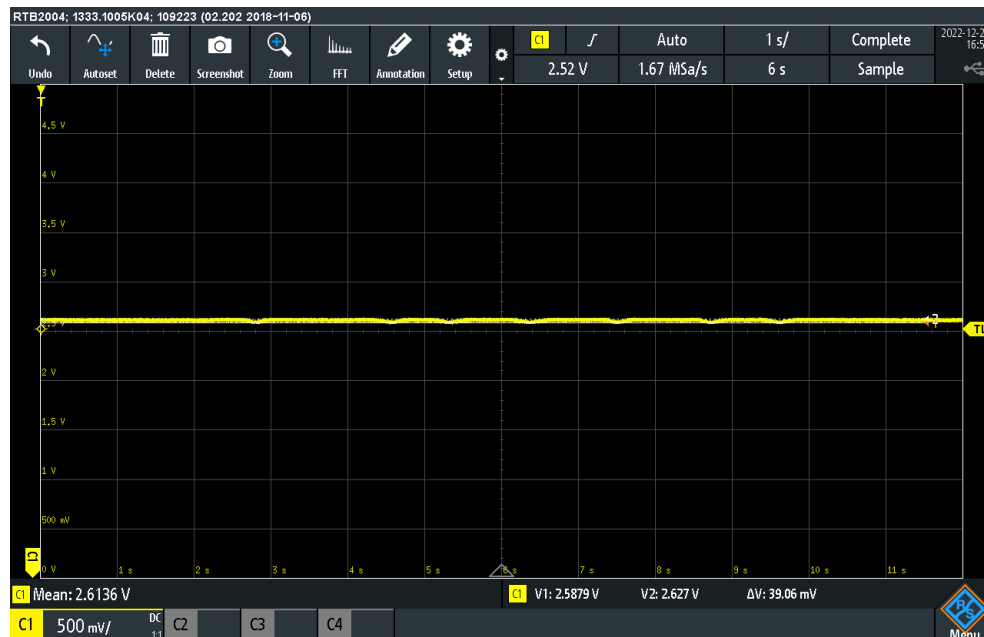


3.2.2.att. Metode, kā tika, atrasta lielākā signāla izmaiņa

Strāvas vadītāja un sensora iespiestā plate atrodas paralēli viena otrai. Bet AMR sensors ir ielodēt 45° leņķī.

Veicot sākotnējos mērījumus, bija problēmas ar pilnā signāla pastiprinātāja ķēdi, kas atradās uz vienas iespiestplates ar sensoru. Tādēļ tika izmantoti mērījumi no pirmā operacionālā pastiprinātāja.

Oscilskopa oscilogramma



3.2.3.att. Izejas signāla vērtība no V_{out_mid} pie 1mm vadītāja platuma un 0.2A



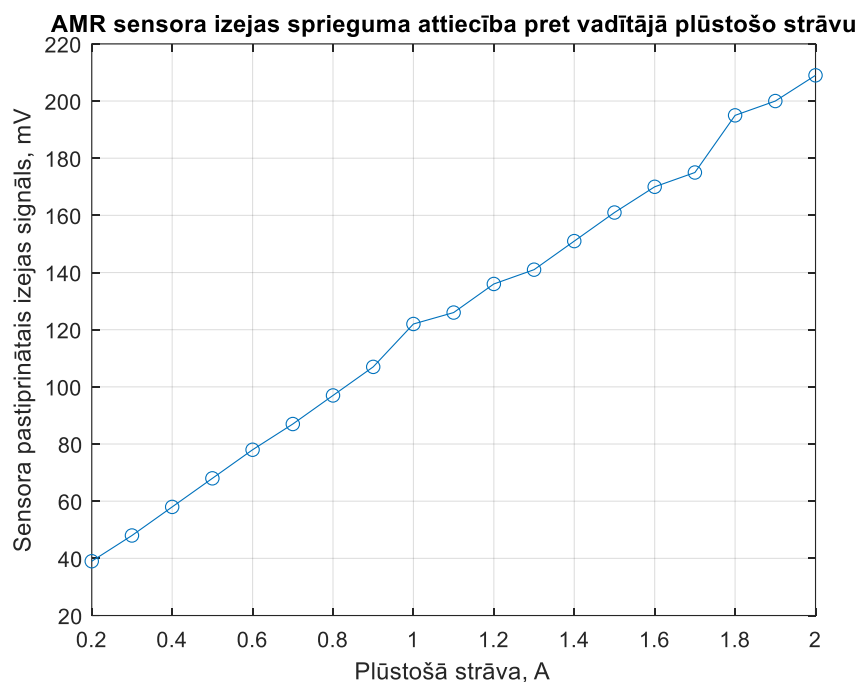
3.2.4.att. Izejas signāla vērtība no V_{out_mid} pie 1mm vadītāja platuma un 2A

Apskatot oscilogrammas ir redzams ka pie mazām strāvām vadītājā. Sprieguma izmaiņas uz sensoru arī būs mazas, neskatoties uz to, ka pastiprinājuma koeficients ir 100 reizes. Oscilogrammās ir arī novērojamas šaurā pastiprinātāja frekvenču caurlaides līkne. Veicot mērījums ātri nedrīkstēja kustināt mērierīci pāri vadītājam, jo tad bija iespējamība, ka netika sasniegta izejas sprieguma maksimālā izmaiņa.

Mērījumu tabula:

Strāva, A	2	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
V _{mid} , mV	209	200	195	175	170	161	151	141	136	126	122	107	97	87	78	68	58	48	39

Rezultāti:



3.2.5.att. Sensora izeja pastiprinātā izejas sprieguma attiecība pret plūstošo strāvu.

Secinājumi:

Veicot mērījumus tika atrasta jutīgākā sensora vieta, kas ir aptuveni sensora 3. un 4. izvads. Veicot mērījumus atklājās rezultātu precizitāti ietekmējošs faktors. Lai iegūtu pēc iespējas precīzāku līdzsprieguma izejas vērtību, oscilloskopam bija jāuzstāda pēc iespējas lielāka vertikālā izšķirtspēja. Palielinot izšķirtspēju palielinājās arī redzamais troksnis uz oscilloskopa. Mērot ar iebūvēto kursora funkciju sprieguma izmaiņas lielumu, bija jāsaskaras ar troksni uz šī signāla, kas ietekmēja precizitāti mērījumiem un noteikti ieviesa neprecizitāti rezultātos. Tādēļ ir redzamas sprieguma vērtības pa 5 vai 10 mV daudzos mērījumos. Jo kursoru varēja novietot soļos pa aptuveni 5mV. Bet ir novērojama gandrīz lineāra sakarība starp sensora izejas signālu un vadītājā plūstošo strāvas vērtību.

3.2.2 Ierīces mērījumi dažāda platuma celiņiem un dažādām strāvas

vērtībām

Tehniskais pamatojums:

Pārbaudīt sensoru iespīestās plates darbību mērot magnētisko indukciju, kuru rada uz iespīedplates uztrasēti celiņi dažādos platumos. Un cerēt novērot nomērītā signāla atšķirību no vadītāja platuma pie vienādas strāvas.

3.5. tabula

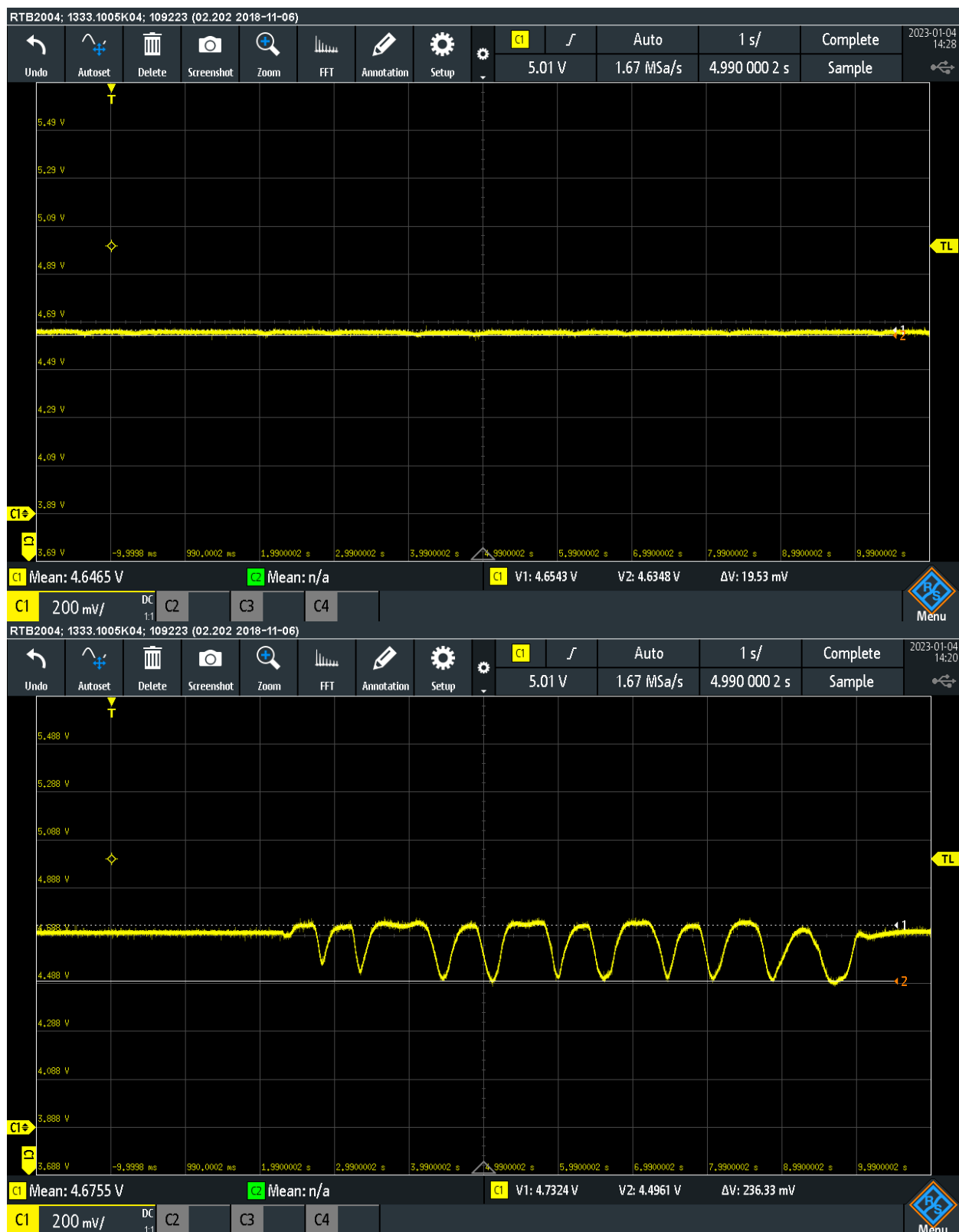
Iekārtu un ekipējuma saraksts:

Apraksts	
Sensoru mērierīce	AMR HMC1051z
Strāvas vadītāja iespīedplate	
Barošanas avots, sensoram	9V baterija
Barošanas avots strāvas vadītājam	RD6018
Ociloskops	Rhode & Schwarz RTB2004

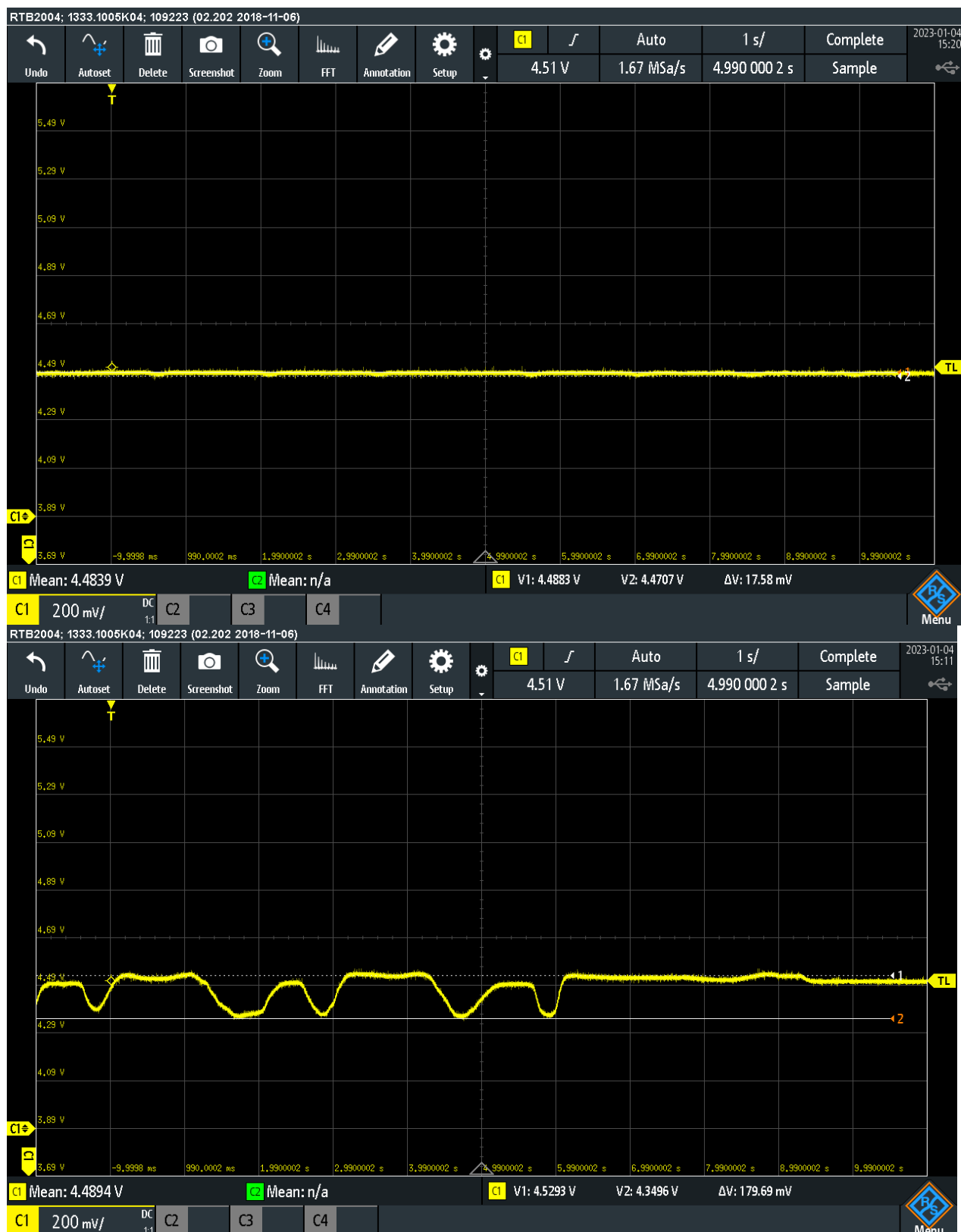
Eksperimenta ķēdes slēgums

Eksperimenta gaita

Slēgums un mērījumu uzņemšanas metodika ir līdzīga kā iepriekšēja eksperimentā, izņemot to, ka tiek, mainīta vadītāju platumi.



3.2.6.att. Augšējais vadītāja platums 0.25mm un plūstošā strāvas vērtība 0.04A, apakšējais vadītāja platums 0.25mm un strāvas vērtība 1A



3.2.7.att. Augšējais vadītāja platums 2mm un strāvas vērtība 0.04A, apakšējais vadītāja platums 2mm un strāvas vērtība 1A

Apskatot oscilogrammas un mērījumus, ir redzamas nelielas izejas signālu vērtību atšķirības. Pie vienādas plūstošas strāvas vērtībās ir redzams neliels kritums izejas signālā. Viens no izskaidrojumiem, ka sensora jutības zona ir mazāka par vadītāja platumu. Tādējādi nespējot sajūst pilnu lauka indukciju. Vēl viens izskaidrojums, ka strāvas blīvums ir mazāks, jo celiņa platums ir 8 reizes lielāks un tādējādi šķērsriezuma laukums arī ir lielāks.

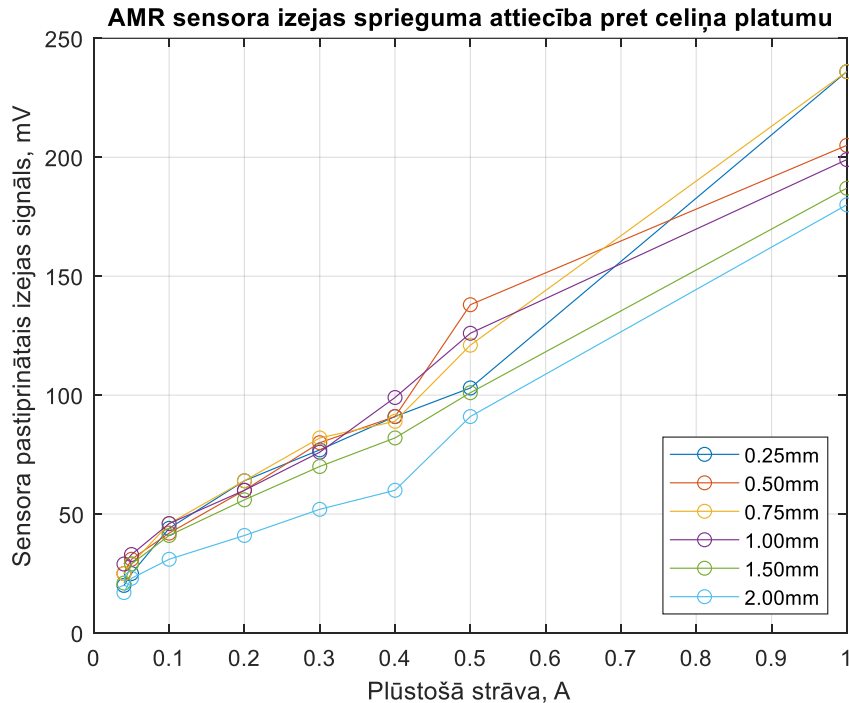
Mērījumu tabula:

3.6. tabula

Rezultāti mērījumiem pie 0.25mm un 2mm vadītāja platuma

Strāva, A	Celiņa platums, mm	Vout, mV	Celiņa platums, mm	Vout, mV
0.04	0.25	20	2	17
0.05		25		23
0.1		44		31
0.2		64		41
0.3		77		52
0.4		91		60
0.5		103		91
1		236		180

Rezultāti:



3.2.8.att. AMR mērierīces izejas spriegumu attiecība pret vadītāja platumu

Secinājumi:

Veicot mērījums otro reizi ar AMR mērierīci, jau bija iegūtas nedaudz zināšanas, kā uzlabot rezultātus. Barošana ķēdei tika aizstāta ar 9V, kas palielinātu mērtilta izejas signālu atšķirību un iegūtu lielāku izejas signāla vērtību. Kuru vieglāk un precīzāk varētu izmērīt. Visiem mērierīces izejas signāliem pie dažādiem vadītāja platumiem ir novērojama lineāra attiecība pret plūstošo strāvu.

4 Tehniski ekonomiskais novērtējums

4.1 Rezultātu analīze

Izstrādājot mērierīces, bija noteikts, lai būtu spēja nomērīt strāvas no 10mA. Šo parametru ar pašreizējajām mērierīcēm nav iespējams izdarīt. Ir nepieciešams uzlabot signāla izšķirtspēju un sensoru jutību. Piemēram izmantojot Holla sensorus, izmantot sensorus ar vēl lielāku jutību - 90mV/mT vai lielāku. Apskatīt koncentratoru izveidi no magnētiska materiāla. Ir iespēja šādos darbos izmantot adaptīvos ražošanas procesu līdzīgi kā 3d plastmasas printerus. Protams, signālu var arī pastiprināt un var veikt kalibrācijas ar noteiktu strāvas vērtību un formu. Attīstot tālāk AMR sensora, mērierīci izmantojot, HMC1051z sensors ir jāņem vērā arī temperatūras ietekme uz šo sensoru.

Attīstot šo izpētes darbu tālāk, būtu jāizveido atkārtojams veids mērījumiem, kur neietekmētu manas darbības ātrums vai novietojums starp mērījumiem. Sistēma un apstākļi būtu atkārtojami. Rezultātu pierēģistrēšanu būtu nepieciešams automatizēt, lai paātrinātu mērījumu veikšanu un būtu spējīgi veikt ātrākas mērījumu sērijas.

4.2 Ekonomiskais novērtējums

4.1. tabula

Prototipu mērierīču izstrādes izmaksas

Nr.p.k	Pozīcija	Cena (Euro)	Daudzums	Summa (Euro)
1.	Holla sensora Iespiedplates ražošana un piegāde	4,76	2	9,52
2.	AMR sensora Iespiedplates ražošana un piegāde	13,76	2	27,52
3.	Strāvas vadītāja Iespiedplates ražošana un piegāde	4,54	1	4,54
4.	Holla sensora mēriekārtas komponentes	8,00	2	16,00
5.	AMR sensora mēriekārtas komponentes	55	1	55,00
			Kopā:	112,58

Prototipu Iespiedplates tika pasūtītas Eiropā. Komponenti tika pasūtīti no ASV to nodokļi, un atmuītošanas izdevumi ir jau ieskaitīti pie to izmaksām.

AMR mēriekārtas prototips izmaksāja par nepilniem 25 eiro vairāk, jo, iegādājoties un saņemot komponentus, nepārbaudīju viņus. Un pēc vairāk nekā, 2 mēnešiem veicot prototipa montāžu, tika atklāts, ka komponents ir piegādāts bojāts. Sakarā ar veikala politiku vairs nebija iespējas veikt pieteikumu par bojātu komponentu 30 dienas pēc to pirkuma.

5 Secinājumi

Šī darba gaitā tika apskatītas bezkontakta strāvas mērīšanas metodes un to realizācijas. Izvēlēti tehniskie risinājumi, lai izveidotu mērierīces. Izvēloties sensorus, kas ir pieejami tirgū, kurus arī pielieto citās līdzīgās iekārtās un ir ražotāja izveidota dokumentācija, lai pielietotu šos komponentu šādās situācijās.

Veicot metožu apskatu, bija saprotams, ka katram gadījumam var atrast piemērotāko strāvas mērīšanas metodi. Lai to izdarītu, ir jānosaka nepieciešamie parametri, izolācijas sprieguma vērtības. Mērāmās strāvas diapazonus un nepieciešamo izšķirtspēju, apkārtējās vides ietekmi. Jo magnētiskā lauka strāvas mērītāji ir jutīgi pret ārēju magnētisko lauku. Šādas ietekmes ir iespējams samazināt un sistemātiski noņemt.

Veicot mērītāju pirmo prototipu ķēžu slēgšanu un iespiedplašu izklājumu, bija daudzi nezināmie faktori, kas varēja ietekmēt mērierīces darbību un rezultātus. Šeit būtu noderējis izstrādāt prototipu uz parastas montāžas plates un veikt eksperimentus, pirms izstrādāja iespiedplates.

Šādus mērījumus veicot, ir ļoti svarīgs atkārtojams mērierīces novietojums un mērāmās strāvas vērtības. Lai izslēgtu pēc iespējas vairāk mainīgos faktorus, izstrādājot mērierīces signāla apstrādes daļu un mehānikas daļu. Ja šo ierīci censtos pārvērst par plašāk pieejamu mērierīci, priekš hobijs vai pētniecības vajadzībām, ir nepieciešams precīzāk pārdomāt nepieciešamās funkcijas un sensoru spējas izpildīt šīs funkcijas.

6 Izmantotā literatūra

1. *MLX91206 Datasheet* [tiešsaiste]. ASV: Melexis, 2022 [skatīts 2022.g. 25.maijā]. Pieejams: <https://www.melexis.com/en/product/mlx91206/70khz-programmable-imc-hall-current-sensor>
2. *Use case of DRV421* [tiešsaiste]. ASV: Texas instruments, 2017 [skatīts 2022.g. 25.maijā]. Pieejams: <https://e2e.ti.com/support/sensors-group/sensors/f/sensors-forum/683921/drv421-question-about-use-case-condition>
3. *Use of DRV421 for small current sensing* [tiešsaiste]. ASV: Texas Instruments, 2017 [skatīts 2022.g. 25.maijā]. Pieejams: <https://e2e.ti.com/support/sensors-group/sensors/f/sensors-forum/920949/drv421evm-core-design-in-very-small-current-measurements-lua-to-5ma>
4. *DRV421 Datasheet* [tiešsaiste]. ASV: Texas Instruments, 2021 [skatīts 2022.g. 25.maijā]. Pieejams: <https://www.ti.com/product/DRV421>
5. *SCPI programming guide for Array 372X electronic load* [tiešsaiste]. ASV: Array, 2014 [skatīts 2022.g. 25.maijā]. Pieejams: <https://www.circuitspecialists.com/images/ARRAY%20372x%20Series%20Electronic%20Load%20SCPI%20%20Programming%20Guide.pdf>
6. Breuer, J. *SCPI Parser* [tiešsaiste]. Čehijas Republika: 2021 [skatīts 2022.g. 26.maijā]. Pieejams: <https://github.com/j123b567/scpi-parser>
7. *Simulation of Magnetic Field from a Current-Carrying PCB Trace* [tiešsaiste]. ASV: Crocus Technology, 2015 [skatīts 2022.g. 4.sept.]. Pieejams: https://crocus-technology.com/documents/AN105_SimulationofMagneticField.pdf
8. *Magnetic Sensor used for Current sensing* [tiešsaiste]. ASV: Crocus Technology, 2015 [skatīts 2022.g. 4.sept.]. Pieejams: https://crocus-technology.com/documents/AN103_GeneralCurrentSensing.pdf
9. *Current sensing Field Strenght vs Distance* [tiešsaiste]. ASV: Crocus Technology, 2015 [skatīts 2022.g. 4.sept.]. Pieejams: https://crocus-technology.com/documents/AN101_MagneticFieldvsDistance.pdf
10. *HMC1051 Datasheet* [tiešsaiste]. ASV: Honeywell, 2019 [skatīts 2022.g. 1.okt.]. Pieejams: <https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Honeywell%20PDFs/HMC1051,52,53.pdf>
11. *Magnetic current sensing* [tiešsaiste]. ASV: Honeywell, 2021 [skatīts 2022.g. 1.okt.]. Pieejams: https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aerobt/en/documents/learn/products/sensors/application-notes/AN209_Magnetic_Current_Sensing.pdf
12. *Set/Reset pulse circuits for magnetic sensors AN-201* [tiešsaiste]. ASV: Honeywell, 2001 [skatīts 2022.g. 1.okt.]. Pieejams: <https://neurophysics.ucsd.edu/Manuals/Honeywell/AN-201.pdf>
13. *Detection of rotor position with MR sensor* [tiešsaiste]. Skatīts[2022. g. 1.dec.]. Pieejams: https://www.researchgate.net/figure/Comparison-between-Hall-AMR-GMR-and-TMR-sensor_tbl1_342208832 (skatītis: 01.12.2022)

14. *DRV5053 Analog Hall Effect Sensor* [tiešsaiste]. ASV: Texas Instruments, 2015, [skatīts 2022. g. 1.dec.]. Pieejams: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv5053.pdf?ts=1669974423311&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FDRV5053
15. *CT100 1D Linear Sensor Datasheet* [tiešsaiste]. ASV: Crocus Technology, 2021 [skatīts 2022.g. 1.dec.]. Pieejams: <https://www.murata.com/products/productdata/8809208447006/CT100E.pdf?1633318210000>
16. Stūrītis, E., *Strāvas mērītāja magnetorezistīvo sensoru izstrāde un izpēte* [Bakalaura darbs]. Latvija: Rīgas Tehniskā Universitāte, 2019 [skatīts 2022. g. 1.dec.].
17. Prof Bruno, P., *The discovery of Giant Magneto-Resistance* [tiešsaiste]. Vācija: Fritz Haber Institūts, 2005 [skatīts 2022.g. 3.dec.]. Pieejams: <https://th.fhi-berlin.mpg.de/th/lectures/materialscience-2005/GMR-2.pdf> skatīts(03.12.2022)
18. High Sensitivity Differential Giant Magnetoresistance (GMR) Based Sensor for Non-Contacting DC/AC Current Measurement Cristian Mușuroi, Mihai Oproiu, Marius Volmer * and Ioana Firastrau 1 Department of Electrical Engineering and Applied Physics, Transilvania University of Brasov, 29 Blvd. Eroilor, 500036 Brasov, Romania; cristian.musuroi@unitbv.ro (C.M.); mihai.oproiu@unitbv.ro (M.O.); firastrau@unitbv.ro (I.F.) * Correspondence: volmerm@unitbv.ro Received: 10 December 2019; Accepted: 3 January 2020; Published: 6 J
19. *INA143 Datasheet* [tiešsaiste]. ASV: Texas Instruments/Burr Brown, 1999 [skatīts 2022.g. 12.dec.]. Pieejams: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina143.pdf?ts=1671185889866&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FINA143
20. *Typical Cores and Shields Geometries* [tiešsaiste]. ASV: Melexis, 2022 [skatīts 2022.g. 12.dec.]. Pieejams: <https://www.melexis.com/en/documents/documentation/application-notes/application-note-cores-and-shields-geometries>
21. Wen, Z., Sukegawa, H., Kasai, S., Inomata, K., Mitani, S., *Tunnel magnetoresistance and spin-transfer-torque switching in polycrystalline Co₂FeAl full-Heusler alloy magnetic tunnel junctions on Si/SiO₂ amorphous substrates* [tiešsaiste]. Japāna: National Institute for Material Science, 2014 [skatīts 2022.g. 14.dec.]. Pieejams: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1408/1408.0341.pdf>
22. Musuroi, C., Oproiu, M., Volmer, M., Firastrau, I., *High Sensitivity Differential Giant Magnetoresistance (GMR) Based Sensor for Non-Contacting DC/AC Current Measurement* [tiešsaiste]. Rumānija: Transilvānijas Universitāte Brasov, 2019 [skatīts: 2022.g. 14.dec.]. Pieejams: <https://www.nve.com/Downloads/sensors-20-00323.pdf>
23. Tsukakoshi, Y., *What's the Difference Between TMR and GMR Sensors?* [tiešsaiste]. Japāna, TDK Group, 2017 [skatīts 2022.g. 25.dec.]. Pieejams: <https://www.electronicdesign.com/industrial-automation/document/21805211/whats-the-difference-between-tmr-and-gmr-sensors-pdf-download>
24. Williams, I., *Introduction to Magnetic Current Sensing TI Precision Labs – Magnetic Sensors* [tiešsaiste]. ASV: Texas Instruments, 2021 [skatīts 2022.g. 12.dec.]. Pieejams:

<https://training.ti.com/sites/default/files/docs/magnetic-sensors-introduction-to-magnetic-current-sensing-presentation-quiz.pdf>

25. Braun, W., *Little Bee B1* [tiešsaiste]. ASV: Stanfordas Universitāte, 2021 [skatīts 2022.g. septembrī]. Pieejams: <https://github.com/westonb/little-bee-B1>
26. Dr., Robertson, P., *Cambridge University Researchers Microfabricate Fluxgate Magnetic Sensors* [tiešsaiste]. Apvienotā karaliste: Kembridžas Universitāte, 2005 [skatīts 2022.g. 10.dec.]. Pieejams: <https://www.fierceelectronics.com/components/cambridge-university-researchers-microfabricate-fluxgate-magnetic-sensors>
27. *I-prober 520 positional current probe Datasheet* [tiešsaiste]. Apvienotā Karaliste: Aim TTI, 2014 [skatīts 2022.g. 14.dec.]. Pieejams: https://resources.aimtti.com/datasheets/AIM-I-Prober_520_meter_data_sheet-Iss1A.pdf
28. Nibir, S., Biglarbegia, M., Parkhideh, B., *A Non-Invasive DC-10MHz Wideband Current Sensor for Ultra-Fast Current Sensing in High Frequency Power Electronic Converters* [tiešsaiste]. IEEE explore, 2018 [skatīts 2022.g. 20.dec.]. Pieejams: <https://ieeexplore.ieee.org/ielam/63/8736077/8546775-aam.pdf>
29. *I-Prober Instruction Manual* [tiešsaiste]. Aim-TTI: Apvienotā Karaliste: 2017 [skatīts 2022.g.25.dec.]. Pieejams: https://resources.aimtti.com/manuals/I-prober_Instruction_Manual-Iss7.pdf
30. Ettelt, D., *Conception et fabrication d'un magn_eto_m_etre _a jauge de contrainte* [tiešsaiste]. Francija: Grenobles universitāte, 2012 [skatīts 2023.g. 1.jan.]. Pieejams: https://www.researchgate.net/publication/281533077_Conception_and_fabrication_of_a_strain-gage_magnetometer
31. *What is Fluxgate* [tiešsaiste] <https://www.sensorland.com/HowPage071.html>
32. *Integrated current sensors* [tiešsaiste]. Allegromicro: Pieejams: <https://www.allegromicro.com/en/products/sense/current-sensor-ics>
33. *ACS37610 Coreless, High precision Hall-effect Current Sensor IC datasheet* [tiešsasite]. Allegromicro: ASV, 2021 [skatīts 2023.g. 1.jan.]. Pieejams: <https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs37610-datasheet.ashx>
34. *Tunnel magnetoresistance* [tiešsaiste]. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Tunnel_magnetoresistance
35. Wiling, S., Schlage, K., Bocklage, L., Moayed, M., *Novel Tunnel Magnetoresistive Sensor Functionalities via Oblique-Incidence Deposition* [tiešsasite]. ASV: American Chemical Society, 2021[skatīts 2023.g. 2.jan.]. Pieejams: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.1c03084>

7 Pielikumi

Viss šis darbs un pielikumi ar ražošanas dokumentiem, ir atrodams:
<https://github.com/EmilsSturitis/MasterThesis>

1. Pielikums. Strāvas radītā magnētiskā lauka Matlab skripts.
2. Pielikums. Holla mēriekārtas elektriskā shēma.
3. Pielikums. Holla mēriekārtas iespiedplate.
4. Pielikums. AMR mēriekārtas elektriskā shēma.
5. Pielikums. AMR mēriekārtas iespiedplate.
6. Pielikums. AMR sensora pilnā mērījumu tabula.
7. Pielikums. Strāvas vadītāja iespiedplate
8. Pielikums. Holla sensora eksperimenta datu vizualizācijas Matlab skripts.
9. Pielikums. AMR mēriekārtas pirmā eksperimenta datu vizualizācijas Matlab skripts.
10. Pielikums. AMR mēriekārtas otrā eksperimenta datu vizualizācijas Matlab skripts.