



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ
ФАКУЛТЕТ
ДЕПАРТМАН ЗА ФИЗИКУ



МЕРЕЊЕ МАГНЕТНОГ ПОЉА ПОМОЋУ МАГНЕТООТПОРНОГ СЕНЗОРА

-дипломски рад-

Ментор:
Проф.др. Федор Скубан

Кандидат:
Борис Бањац

Нови Сад, 2018

Садржај

1. Увод.....	3
2. Историја	3
3. Подела магнетоотпорности	4
3.1. Обична магнетоотпорност	5
3.2. Анизотропна магнетоотпорност	6
3.3. Гигантска магнетоотпорност	10
3.4. Колосална магнетоотпорност	14
3.5. Тунелна магнетоотпорност	15
4. Експериментална поставка.....	16
4.1. ГМО сензор	16
4.2. Мерна апаратура	19
5. Мерење	20
5.1. Транслација	20
5.2. Ротација	28
6. Закључак.....	36
7. Литература.....	37
Кратка биографија кандидата	38
Кључна документација.....	39

1. Увод

Уређаји намењени за мерење неке физичке величине и конвертовање исте у сигнал који је погодан за читање од стране неког другог мерног инструмента или самог експериментатора називају се сензори. Без њих, свакодневница је незамислива јер се примењују у разним уређајима: у домаћинству, индустрији, саобраћају, метеорологији, медицини, итд. Сензор који је коришћен у анализи ефекта магнетоотпорности у овом раду је сензор који служи за мерење јачине магнетног поља, а ради на принципу гигантске магнетоотпорности о којој ће бити реч нешто касније. Прво мало историје...

2. Историја

Магнет

За магнетне особине се знало још 600 година пре нове ере. По предању, „магнет“ је добио име по грчком пастиру Магнусу са Крита. Магнус је на сандалама имао гвоздене клинове и док је ишао по камењу приметио да му се сандале „лепе“ за то камење. Наравно то камење је била руда магнетит. Талес из Милета, а после и други грчки филозофи, писали су о необичним особинама црне руде металног сјаја која привлачи гвоздене предмете. По неким литературама магнет је добио назив по малоазијском месту „Магнезијум“ одакле се руда магнетит копала. Данас магнетима зовемо све предмете који имају својство привлачења гвоздених предмета.[1]

Електрична отпорност

Електрична отпорност материјала је особина да се материјал супротставља протоку електричне струје. Ову особину индиректно је први приметио Хенри Кевендиш 1781. који је упоређивао јачину електричних удара коју је осетио затварајући коло са цевима напуњених различитим концентрацијама раствора соли, сопственим телом, и закључио да концентрација соли има неке везе са проводљивошћу [2]. Георг Симон Ом, по коме је јединица за електрични отпор и добила име, је експериментисао са отпорношћу од 1825. до 1826. да би 1827. објавио прве резултате у књизи "Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet" (Галванска електрична кола проучавана математички) [3]. Омов закон је вероватно најзначајнији од раних описа особина електричне енергије. Иако се данас сматра јако очигледним, у доба када је Ом објавио свој рад, на његове резултате се гледало са одбојношћу и скептицизмом.[4]

Магнетоотпорност

Магнетоотпорност је појава промене електричног отпора, односно електричне проводљивости неког материјала под утицајем спољашњег магнетног поља. Британски физичар Вилијам Томсон, познатији као лорд Келвин 1856. је вршио експерименте где је мерио отпорност материјала, где је запазио промену отпорности ових материјала од свега пар процената при њиховом излагању магнетном пољу [5]. Упркос томе, тек у новије време тј. пред крај XX века почиње детаљније изучавање и примена овог феномена у пракси, јер је тек са развојем технологије и метода истраживања материјала могло доћи до значајнијих резултата који доводе до примене овог ефекта у савременим електронским уређајима.[6]

3. Подела магнетоотпорности

Постоје различити облици магнетоотпорности материјала. Они зависе од разних фактора: спољашњих услова, облика у којем се дати материјал користи, а највише од саме врсте материјала. Прва битна разлика у испољавању овог ефекта јесте сама промена отпорности. Она може бити: *позитивна* уколико се повећава и *негативна* уколико се смањује отпорност при довођењу спољашњег магнетног поља. Величина ефекта код немагнетних метала је много мања у односу на полупроводничке материјале где је промена релативне отпорности материјала при удређеним условима у пољу реда величине неколико хиљада процената. Такође поларизација спина електрона у магнетним материјалима и магнетно уређеним структурама доприноси овом ефекту чак и при слабиим магнетним пољима. Суперпроводни материјали, који проводе електричну струју без приметног отпора, престају да показују своје суперпроводне особине при спољашњем магнетном пољу, јер им оно, уколико је одговарајућег интензитета нарушава суперпроводно стање чиме суперпроводне материјале претвара у материјале који имају неку мерљиву коначну отпорност. У зависности од положаја електричног поља које узрокује протицање електричне струје кроз материјал у односу на магнетно поље у којем се материјал налази, разликујемо попречну (трансверзалну) магнетоотпорност уколико су ова два поља међусобно нормална и уздужну (лонгитудиналну) магнетоотпорност уколико су ова два поља међусобно паралелна [6]. У сваком случају, величина овог ефекта се најчешће изражава преко релативне промене специфичне отпорности

$$\frac{\Delta\rho}{\rho(0)} = \frac{\rho(B)-\rho(0)}{\rho(0)} \quad (1)$$

где су $\rho(0)$ и $\rho(B)$ – специфичне отпорности материјала без и са примењеним магнетним пољем интензитета B , респективно.

Магнетоотпорности се најопштије може поделити на [7]:

- обична магнетоотпорност (ОМО),
- анизотропна магнетоотпорност (АМО),
- гигантска магнетоотпорност (ГМО),
- колосална магнетоотпорност (КМО),
- тунелска магнетоотпорност (ТМО).

3.1. Обична магнетоотпорност (ОМО)

Код ове врсте, механизам магнетоотпорности заснива се на деловању Лоренцове силе на покретна наелектрисања у магнетном пољу [7]. Ако се посматра кретање електрона у металним проводницима, до промене отпорности неће доћи ако су електрично и магнетно поље паралелни, јер на наелектрисања која се крећу паралелно са линијама сила магнетног поља не делује Лоренцова сила, тако да нема лонгитудиналне магнетоотпорности. Видимо да је само у случају када се носиоци наелектрисања крећу у односу на вектор магнетне индукције под неким углом ефекат видљив. При паралелној оријентацији електричног и магнетног поља наелектрисања се крећу по спиралној путањи са растућим коракот спирале. Електрон који има компоненте брзине дуж правца магнетног поља ($v_{\parallel}$) и нормално на правац поља ($v_{\perp}$), врши ротацију по кругу полупречника:

$$r = \frac{m^* v_{\perp}}{eB} = \frac{v_{\perp}}{\omega_c} \quad (2)$$

са угаоном (циклотронском) учестаношћу:

$$\omega_c = \frac{eB}{m^*} \quad (3)$$

где је B – магнетна индукција, а m^* – ефективна маса носилаца наелектрисања. Пошто електрично поље утиче само на пораст компоненте брзине $v_{\parallel}$, јасно је да се увећава само корак спиралне путање.

Када електрично и магнетно поље заклапају прав угао, наелектрисања имају сложену путању (циклоида или чак трохоида) између расејања. Ако се са ℓ обележи средња дужина слободног пута, што је део неке сложеније путање, за време τ између два судара је пређени пут наелектрисања дуж правца електричног поља (х-правац, рецимо) свакако мањи:

$$\lambda_x \approx \lambda \cos \phi \approx \lambda \left(1 - \frac{(\omega_c \tau)^2}{2} \right) = \lambda \left(1 - \frac{(\mu B)^2}{2} \right) \quad (4)$$

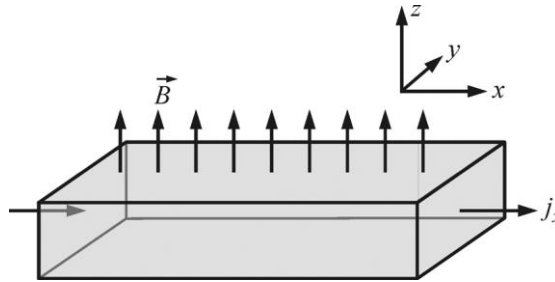
где су ϕ – угао отклона трајекторије наелектрисања од правца електричног поља под утицајем магнетног поља, а μ је покретљивост носилаца, која се добија као:

$$\mu = \frac{e\tau}{m^*} \quad (5)$$

Како је краћи пређени пут између два процеса расејања дуж правца електричног поља то значи да се смањује брзина дрифта, што доводи до мање покретљивости носилаца наелектрисања, чија је последица смањена електрична проводљивост тј. повећање специфичне електричне отпорности.

Мерење магнетног поља помоћу магнетоотпорног сензора

Нешто детаљнија, али такође поједностављена анализа ефекта магнетоотпорности полази од величине силе која делује на покретна наелектрисања у узорку проводног материјала (метала или полупроводника) изложеном деловању електричног и магнетног поља (мада, мора се нагласити да сви материјали испољавају у мањој или већој мери овај ефекат). Претпоставка је да је узорак материјала у облику паралелопипеда дуж којег је успостављено статичко електрично поље дуж x -осе (E_x) које је узрок стационарном протицању струје (слика 1).



Слика 1. Узорак проводника у магнетном пољу $\vec{B}$ усмереном дуж z -осе, кроз који протиче струја густине j_x услед примењеног електричног поља $\vec{E}$ усмереног дуж x -осе.

Спољашње непроменљиво магнетно поље ($\vec{B}$) се уобичајено успоставља дуж z -осе и претпоставља се да није великог интензитета, тако да је $\omega_c \tau < 1$. То значи да се носиоци расејавају знатно пре него што заврше целокупну (циклотронску) орбиту у простору узорка. И на крају, претпоставља се да метални проводник карактерише једноставна сферна Фермијева површ (гранична површина у реципрчном k -простору која одваја попуњена енергетска стања од непопуњених на температури апсолутне нуле) и изотропне, тачније ефективне масе носилаца које су независне од енергије. Релација за силу која делује на покретно елементарно наелектрисање у електричном и магнетном пољу је:

$$\vec{F} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (6)$$

тј.

$$m^* \left(\frac{d}{dt} + \frac{1}{\tau} \right) \vec{v} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (7)$$

где је $\vec{v}$ брзина дрифта, а $1/\tau$ брзина релаксације.

Мерење магнетног поља помоћу магнетоотпорног сензора

Све промене у брзини дрефта се дешавају у равни нормалној на правац магнетног поља тј. у ху-равни, а поља и стање су статички тако да не постоји временска промена дрефта ($dv/dt = 0$), па када се горња једначина разлаже на компоненте оне имају облик:

$$\begin{aligned}\frac{m^* v_x}{\tau} &= e(E_x + v_y B) \\ \frac{m^* v_y}{\tau} &= e(E_y - v_x B)\end{aligned}\tag{8}$$

Решење ових једначина добијамо у облику ($\mu = e\tau/m^*$):

$$\begin{aligned}v_x &= \frac{e\tau/m^*}{1 + (e\tau B/m^*)^2} \left(E_x - \frac{e\tau B}{m^*} E_y \right) = \frac{\mu}{1 + (\mu B)^2} (E_x + \mu B E_y) \\ v_y &= \frac{e\tau/m^*}{1 + (e\tau B/m^*)^2} \left(E_y + \frac{e\tau B}{m^*} E_x \right) = \frac{\mu}{1 + (\mu B)^2} (E_y - \mu B E_x)\end{aligned}\tag{9}$$

Густина струје j зависи од концентрације носилаца наелектрисања n и од брзине дрефта:

$$\vec{j} = ne\vec{v} = ne\mu\vec{E}\tag{10}$$

Да би добили одговарајуће струје дуж појединих праваца уводимо смену $\sigma_0 = ne\mu$

па је:

$$\begin{aligned}j_x &= \frac{ne\mu}{1 + (\mu B)^2} (E_x + \mu B E_y) = \frac{\sigma_0}{1 + (\mu B)^2} (E_x + \mu B E_y) \\ j_y &= \frac{ne\mu}{1 + (\mu B)^2} (E_y - \mu B E_x) = \frac{\sigma_0}{1 + (\mu B)^2} (E_y - \mu B E_x)\end{aligned}\tag{11}$$

Овакав упрошћен приказ има за циљ да дочара колико је теоријска анализа магнетоотпорног ефекта комплексна, јер и у овако ограниченим условима видимо да је много фактора који утичу на овај ефекат.

Мерење магнетног поља помоћу магнетоотпорног сензора

Трансверзална магнетоотпорност [6] се односи на правац паралелан спољашњем електричном пољу и нормалном на магнетно поље. У правцу дуж x -осе, када је $j_y = 0$, из релације (11) следи да је $E_y = \mu B E_x$, што у коначном изразу даје густину струје:

$$j_x = \frac{\sigma_0}{1 + (\mu B)^2} (E_x + (\mu B)^2 E_x) = \sigma_0 E_x \quad (12)$$

Уколико материјал има сферну фермијеву површ и један тип носилаца наелектрисања (материјал са једнаким ефективним масама m^* и временима релаксације τ), према овом образцу магнетоотпорност се неће манифестовати.

Магнетоотпорност ће се јавити у овој конфигурацији примењеног електричног и магнетног поља само због сложенијег облика Фермијеве површи и присуства више од једне врсте носилаца наелектрисања, што узрокује да су њихове ефективне масе различите. Узмемо ли у обзир и дистрибуцију, тј. различите брзине дрифта носилаца наелектрисања видећемо промену електричне отпорности проводног материјала (метала или полупроводника), што је резултат деловања магнетног поља на проток струје кроз њега. У сваком наведеном случају, магнетоотпорност је директно сразмерна квадрату магнетне индукције ($\sim B^2$). Ако је електрично поље усмерено дуж x -осе, посматрана компонента специфичне отпорности има облик:

$$\rho_{xx} = \frac{1 + (\mu B)^2}{\sigma_0} = \rho_0 (1 + (\mu B)^2) \quad (13)$$

из којег добијамо израз за трансверзалну магнетоотпорност:

$$\frac{\rho_{xx} - \rho_0}{\rho_0} = (\mu B)^2 \quad (14)$$

што се у већини случајева поклапа са експерименталним резултатима.

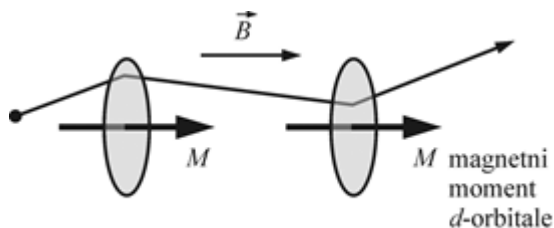
Магнетоотпорни ефекат је веома слаб чак и при јаким магнетним пољима за немагнетне проводне материјале што је експериментално показано. Промена отпорности је позитивна (отпорност расте) и у случају када су електрично и магнетно поље паралелни ($\Delta\rho_{\parallel}$) и када су узајамно нормални ($\Delta\rho_{\perp}$), с тим да је $\Delta\rho_{\perp} > \Delta\rho_{\parallel}$. У зависности од структуре електронских орбитала на Фермијевој површи разликујемо три облика обичне магнетоотпорности:

- У металима са затвореним Фермијевим површима, електрони су ограничени на своје орбите у k -простору. Код њих магнетно поље повећава циклотронску фреквенцију затворених орбита. У веома јаким магнетним пољима у овим случајевима отпорност достиже сатурацију. Метали који показују овакво понашање су In, Al, Na и Li.

- Код метала са једнаким бројем електрона и шупљина, јачањем магнетног поља магнетоотпорност расте и она не зависи од кристалографске оријентације. У овој групи су Bi, Sb, W и Mo.
- Метали који поседују Фермијеве површи са отвореним орбитама у неким кристалографским правцима испољавају велику магнетоотпорност када је поље усмерено у тим правцима, док у другим правцима где су орбите затворене, магнетоотпорност достиже сатурацију. Ово се може уочити код Cu, Ag, Au, Mg, Zn, Cd, Ga, Tl, Sn, Pb и Pt. [6]

3.2 Анизотропна магнетоотпорност (АМО)

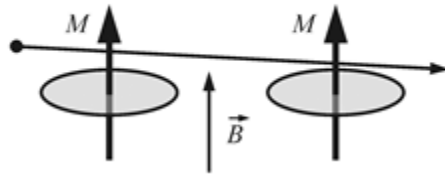
Особина зависности специфичне отпорности материјала од узајамног положаја тока струје кроз материјал и спољашњег магнетног поља се назива анизотропна магнетоотпорност (АМО) [8]. Ово је углавном особина магнетних материјала. Ако неки немагнетни метал, нпр. бакар поставимо у магнетно поље, јавиће се веома мала промена његове електричне отпорности (обична магнетоотпорност). Међутим ако се у исто такво поље постави неки магнетни метал као што је гвожђе, промене у специфичној електричној отпорности зависе од правца електричне струје у односу на линије сила магнетног поља. Порастом јачине магнетног поља паралелно правцу протока струје специфична електрична отпорност расте, док је за случај када су магнетно и електрично поље нормални она опада. Ова разлика између немагнетних и магнетних материјала, омогућава практичну примену овог ефекта код магнетних материјала (иако су и код њих промене отпорности свега неколико процената). Овај ефекат је примењен код глава за снимање података на магнетне слојеве (траке, дискове, итд). Узрок ове појаве у магнетним материјалима је спин-орбитално спрежање (интеракција). Применом спољашњег магнетног поља, деформише се електронски облак око сваког језгра, а то утиче на вероватноћу процеса расејања проводних електрона који се крећу под утицајем електричног поља. Затворене орбите електронских омотача атома мењају оријентацију због магнетног поља. Када су струја и магнетно поље (тј. вектор магнетизације у материјалу) паралелни, електронске орбитале 3d-електрона су оријентисане нормално на правац кретања проводних електрона и ефикасни пресек за њихово расејање се повећава, што чини да отпор материјала ($\rho_{\parallel}$) расте високоотпорно стање (слика 2).



Слика 2. $B \parallel E$ високоотпорно стање

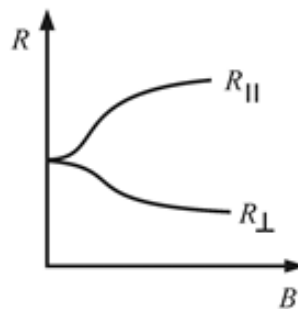
Мерење магнетног поља помоћу магнетоотпорног сензора

Када су ток струје и правац магнетног поља међусобно нормални, тада су електронске орбите у равни кретања проводних електрона, па се тако попречни пресек за расејање се смањује, а самим тим отпорност опада, то је нискоотпорно стање (слика 3).



Слика 3. $B \perp I$ нискоотпорно стање

Слика 4 представља промену специфичне електричне отпорности у зависности од јачине магнетног поља у магнетним материјалима [6].



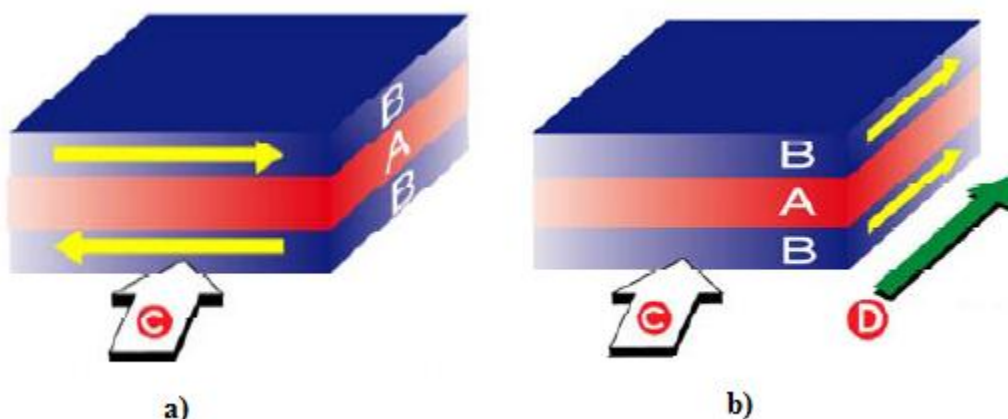
Слика 4. промена отпорности у зависности од јачине магнетне индукције

3.3. Гигантска магнетоотпорност (ГМО)

Гигантску магнетоотпорност је открио М. Бејбич 1988. године и то на вишеструким танкослојним структурама гвожђа и хрома [9]. Вође истраживачких тимова из Француске (Алберт Ферт) и Немачке (Петер Гринберг) су 2007. године добили Нобелову награду из физике за упоредно откриће и тумачење овог ефекта. Назив је последица великих промена у магнетоотпорности, које су код првобитно истраживаних материјала износиле преко 50 % (на ниским температурама).

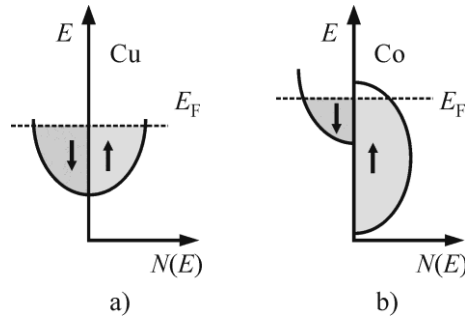
Мерење магнетног поља помоћу магнетоотпорног сензора

Материјали који показују особине ГМО састоје се од наизменично поређаних танких слојева неког феромагнетног материјала (гвожђе, кобалт, никл или њихових легура) и немагнетног материјала (бакар, хром...), при чему су слојеви дебљине тек неколико нанометара (слика 5). Ефекат се испољава у суседним феромагнетним слојевима који су одвојени немагнетним материјалом. Ферт и Гринберг су уочили да се релативна оријентација вектора магнетизације промени из антипаралелне у паралелну, а то узрокује огроман пад електричне отпорности.



Слика 5. В-слојеви феромагнетних материјала, А-слојеви немагнетних материјала, С-смер електричне струје односно правац по коме се мења електрична отпорност, D-смер спољашњег магнетног поља

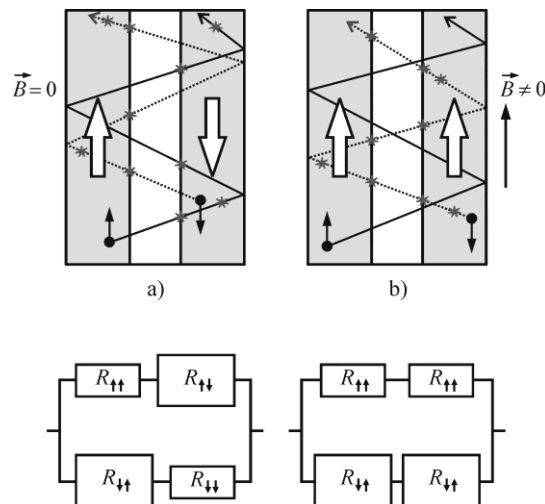
Гигантска магнетоотпорност је резултат два физички различита ефекта [6]. Први ефекат је последица спински зависног расејања проводних електрона у феромагнетним слојевима и представља зависност отпорности од узајамне оријентације вектора магнетизације, док је други постојање антиферомагнетног разменског спрежања (интеракција размене) између слојева феромагнетика. Ова интеракција, која зависи од дебљине немагнетног слоја, доводи до антипаралелне конфигурације када нема примењеног спољашњег магнетног поља (слика 5a). Када се пољем промени оријентација у једном слоју, то доводи до паралелне конфигурације у свим слојевима феромагнетика (слика 5б). Ове две различите конфигурације показују велику разлику у електричној отпорности (10-15% у нормалним условима). Под првим ефектом сматрамо да се електрони са једном оријентацијом спина различито расејавају зависно од смера магнетизације феромагнетног слоја: електрони који имају спин у смеру магнетизације слоја се мање расејавају, средњи слободни пут између два узастопна судара им је дужи, а покретљивост већа, па је за њих је отпорност мања у датом слоју. Електрони чији је спин супротан магнетизацији слоја се више расејавају и тај слој има већи отпор.[10]



Слика 6. Зависност густине енергетских стања $N(E)$ у немагнетику (а) и магнетику (б) од енергије 3d електрона. Осенчена поља су попуњена стања.

Електрони различите оријентације спина се различито понашају због структуре 3d енергетских зона феромагнетика и због различите концентрације слободних енергетских стања у околини Фермијевог нивоа за електроне једне, односно друге врсте у која они након расејања прелазе. Електрони са спином у смеру магнетизације практично попуњавају скоро сва стања у свом делу енергетске зоне (стрелица $\uparrow$ на слици 6б), док електрони супротне оријентације спина попуњавају знатно мањи део 3d зоне (стрелица $\downarrow$ на слици 6б). Расејање електрона са спином супротним магнетизацији је знатно вероватније због више непопуњених нивоа.

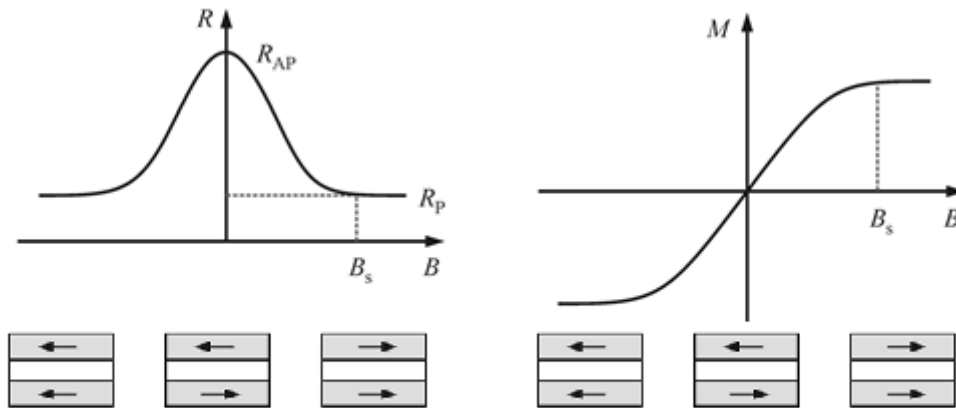
Дакле, проводне електроне делимо у две групе: са паралелном и антипаралелном оријентацијом спина у поређењу са магнетизацијом слоја. Струју чине обе врсте електрона и без обзира да ли се крећу дуж слојева или нормално на њих, они пролазе и кроз границе између слојева.



Слика 7. а) Антипаралелна оријентација магнетизација – високоотпорно стање (R_{ap});
б) Паралелна оријентација магнетизација – нискоотпорно стање (R_p).

Мерење магнетног поља помоћу магнетоотпорног сензора

У одсуству магнетног поља, дакле при антипаралелној конфигурацији магнетизација у феромагнетним слојевима (слика 7а – једноставан случај два феромагнетна слоја одвојена немагнетиком), електрони са једном оријентацијом спина се не расејавају у слоју са идентичном оријентацијом магнетизације, али се зато расејавају у суседном феромагнетном слоју са супротном оријентацијом магнетизације, као и на границама слојева. Исто важи и за електроне супротне оријентације спина. Дакле, за електроне било које оријентације спина један слој пружа мали, а други слој велики отпор. Укупна електрична отпорност ове слојевите структуре (R_{ap}), када се саберу доприноси расејању електрона обе врсте, може се поједностављено приказати паралелном везом отпорника, при чему су у свакој грани отпорници који репрезентују отпорност једне врсте електрона (слика 7а доле – прва стрелица у индексу је оријентација спина, а друга стрелица оријентација магнетизације феромагнетног слоја).



Слика 8. Шематски приказ ефекта ГМО

Када се магнетним пољем промени магнетизација у феромагнетним слојевима у паралелну конфигурацију (слика 7б), електрони са спином у смеру магнетизације са знатно мањом вероватноћом за расејање пролазе кроз слојеве, док се електрони супротног спина расејавају у свим слојевима и на границама слојева. Ова конфигурација даје укупну отпорност структуре (R_{ap}) шематски приказану на слици 7б доле. Може се једноставним рачуном показати да је $R_{AP} > R_P$, тј. да примењено магнетно поље које мења оријентацију магнетизација феромагнетних слојева утиче на смањење отпорности. У оваквом случају од само три слоја, промене су реда 10-так %, али у вишеслојним структурама са 50-так и више слојева, промене отпорности су и преко 90 % на ниским температурама. На слици 8 је приказана промена отпорности слојевите структуре у зависности од јачине и смера магнетног поља

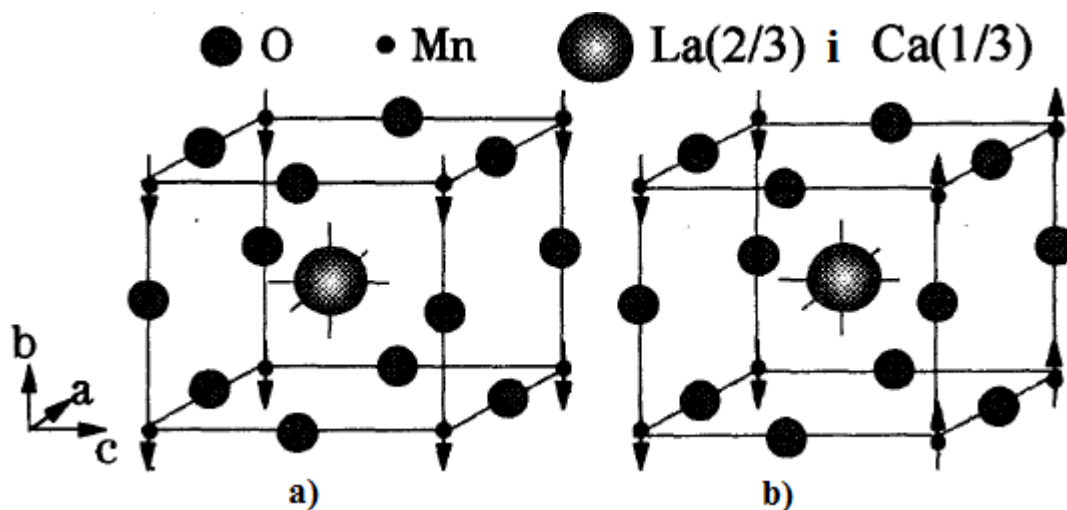
Релативном променом отпорности вишеслојне структуре у магнетном пољу можемо да изразимо ГМО ефекат, а израз изгледа овако:

$$\left(\frac{\Delta R}{R_p} \right)_{\text{GMO}} = \frac{R_{\text{AP}} - R_p}{R_p} \quad (15)$$

Промена електричне отпорности је већа ако пропустимо струју нормално на слојеве у односу на ток струје паралелно слојевима.[7]

3.4. Колосална магнетоотпорност (КМО)

Први пут је колосална магнетоотпорност запажена 1994. године у материјалима типа перовскита мангана, тачније у $\text{La}_x\text{M}_x\text{MnO}_3$ ($\text{M}=\text{Ca}, \text{Sr}, \text{Pb}, \text{Ba}, \dots$). Ефекат се манифестује изузетно великом променом отпорности у магнетном пољу па отуда и назив. Ови материјали су били познати још од 1950-их али се ефекат примењује тек пола века касније. Код ових материјала се врши прелаз из непроводног стања у проводно стање под утицајем пораста температуре, а ефекат КМО се дешава у проводном режиму материјала, када под утицајем магнетног поља отпорност опада и преко 95% (по докторки Џин са националног института за стандарде и технологију у Колораду и до 99.9%)[11]



Слика 9. Кристална структура $\text{La}_x\text{Ca}_x\text{MnO}_3$:
а) високоотпорно стање; б) нискоотпорно стање.

Изглед елементарне ћелије ових материјала је приказана на слици 9. 20–40% јона La^{3+} је замењено двовалентним јонима у структури, као што је Ca^{2+} или Sr^{2+} . Како јони мангана у атомској равни а-б имају феромагнетно уређење спинова, а суседни јони Мп у правцу ц-осе имају супротну оријентацију спина (слика 9а), тако је ово антиферомагнетно уређење окарактерисано високом отпорношћу. Ако уведемо спољашње магнетно поље, оно ће да изврши преоријентацију спинова дуж ц-осе, па ће материјал имати феромагнетно уређење, што доводи до пораста проводљивости, односно смањује се специфична електрична отпорност (слика 9б). У овим материјалима проводљивост је прескочног типа и она се врши између јона Mn^{3+} и Mn^{4+} преко јона кисеоника O^{2-} . На овакав начин провођења јако утиче оријентација спинова суседних јона Мп. Начин деловања овог ефекта још увек није довољно истражен, али је уочено да спољашње магнетно поље утиче на растојања и интеракцију размене између јона, што узрокује феромагнетно уређење спинова, што повећава вероватноћу прескока проводних електрона између јона Мп и утиче на знатно смањење отпорности материјала. Упркос великој промени електричне отпорности овај феномен још увек није адекватан за ширу практичну примену јер се он испољава само у релативно јаким магнетним пољима (реда 1 Т)[10].

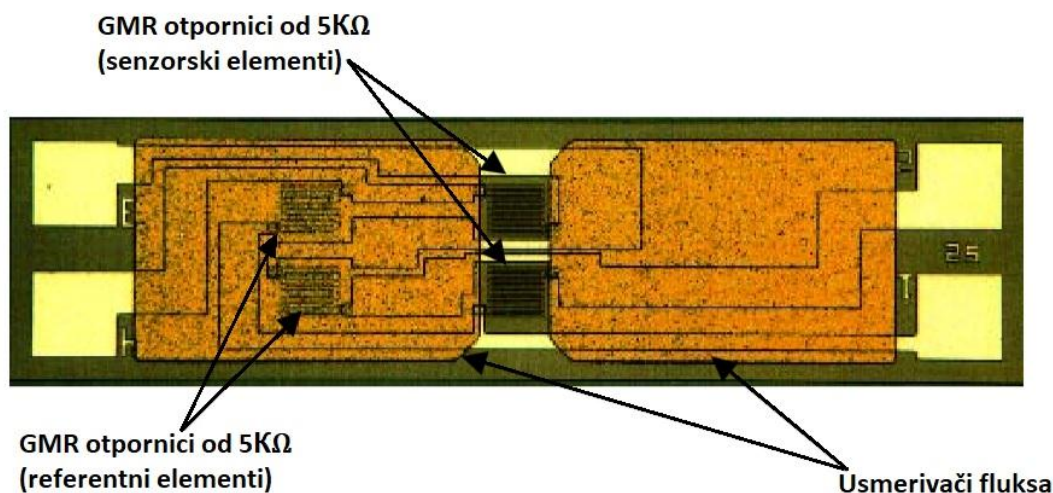
3.5. Тунелна магнетоотпорност (ТМО)

У класичној физици је електрон са енергијом мањом од енергије потенцијалне баријере заробљен испред ње, али у квантној механици постоји коначна вероватноћа да електрон ту баријеру прође, тј. да тунелује. Овај ефекат потврђује таласну природу електрона. На овом ефекту се заснива и тунелна магнетоотпорност, где електрон тунелује кроз изолаторски слој. Појаву је запазио Жулије (М. Jullière) 1975 године [11]. Слично као у случају гигантске магнетоотпорности и тунелна магнетоотпорност се јавља на слојевитим структурама, али је сада немагнетни проводни материјал замењен изолатором дебљине реда 1 nm између феромагнетних слојева (Fe/Ge/Fe). Отпорност тунелујуће струје се јавља због узајамне оријентације вектора магнетизације суседних феромагнетних слојева. У магнетном пољу магнетизација је паралелна, док је без спољашњег магнетног поља антипаралелна. Отпорност је већа у антипаралелној конфигурацији, али апликацијом спољашњег магнетног поља она опада при собним температурама за неколико десетина процената. Због већег ефекта на собним температурама и при спољашњим пољима мање јачине, сматра се да ће у будућности ТМО односу на ГМО преузети водећу улогу у практичној примени, тренутно су у развоју MRAM-меморије (magnetoresistive random-access-memory). [13]

4. Експериментална поставка

4.1. ГМО сензор

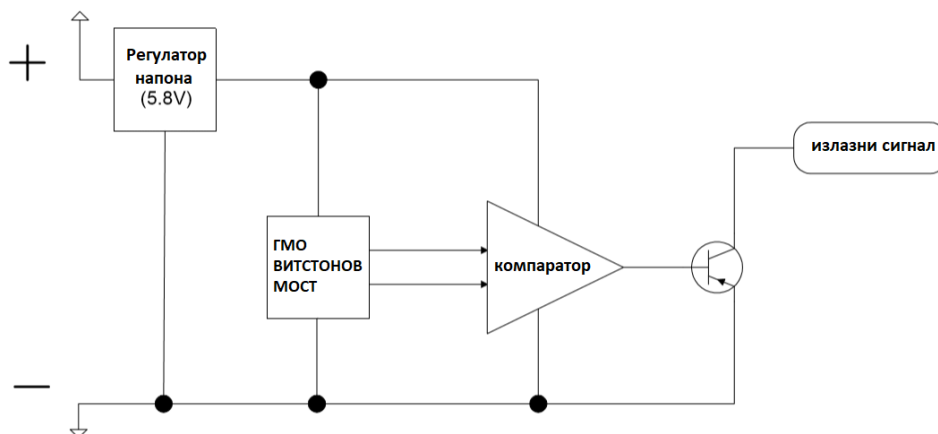
Сензор коришћен у анализи ефекта магнетоотпорности у овом раду је сензор који мери јачину магнетног поља, а ради на принципу ефекта гигантске магнетоотпорности. Сензор је из АА-серије произвођача NVE. Срце овог сензора чини вишеслојни елемент који је направљен од никла, кобалта, гвожђа и бакра. Слојеви су дебљине 15 ангстрема (око 5 атомских слојева), а дебљина свих слојева заједно не прелази 18 μm .



Слика 10. Попречни пресек сензора

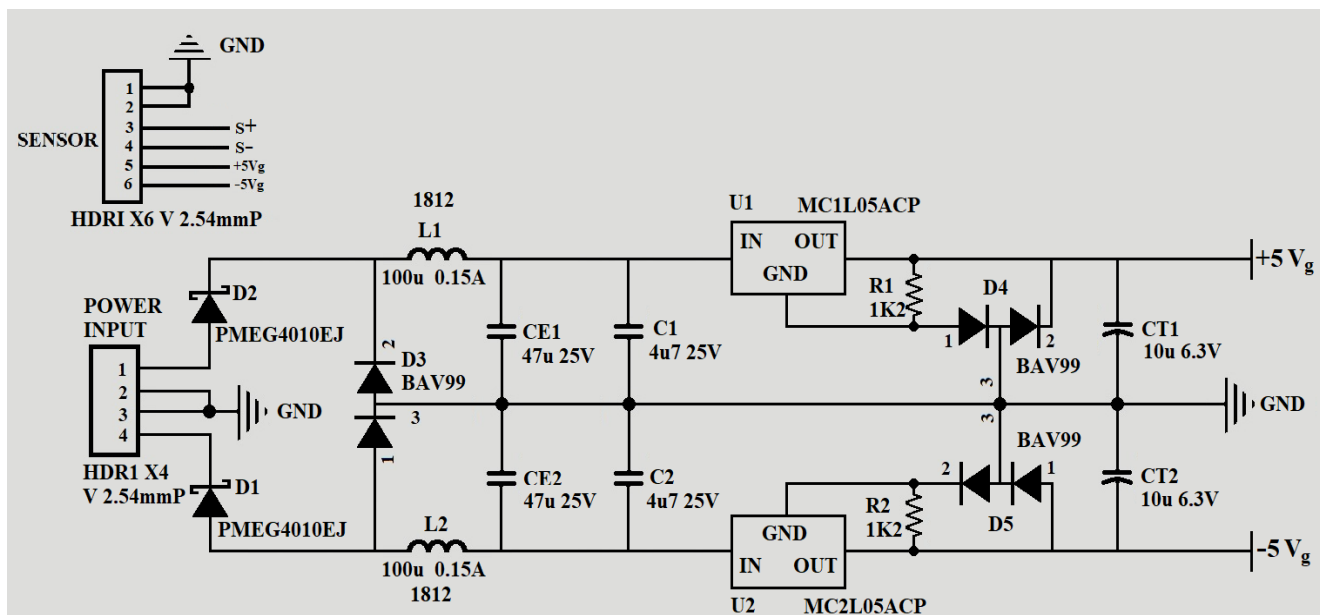
Сензор је конфигурисан као Витстонов мост који се састоји од четири отпорника направљених од магнетоотпорног материјала (ГМО). Два су референтна и заштићени су од поља помоћу концентратора флукса док су друга два изложена магнетном пољу које се мери. Уколико нема магнетног поља Витстонов мост је у равнотежи па је излазни сигнал сензора очекивано нула. Међутим уколико се сензор постави у магнетно поље, изложеним отпорницима опада отпорност док отпорност референтних остаје иста па се ова неравнотежа испољава на излазном сигналу Витстоновог моста. Да би се побољшале карактеристике сензора он је опремљен са електроником за обраду сигнала [14] (слика 11.)

Мерење магнетног поља помоћу магнетоотпорног сензора



Слика 11. Шема електронике која служи за обраду сигнала.

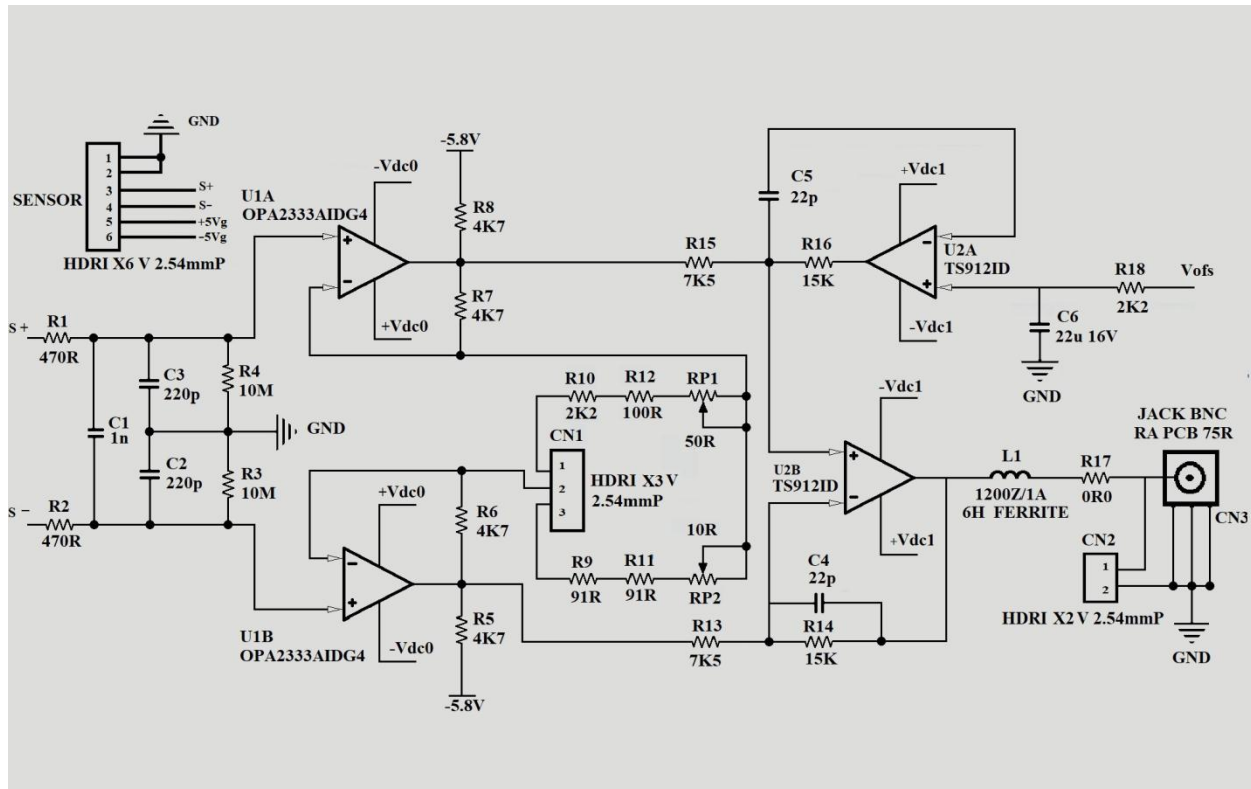
Поред ове стандардне електронике која се налази унутар сензора, при реализацији мерне апаратуре јавила се потреба за појачавачко-стабилизационом јединицом (SPJ). Јединица се састоји од два кола, једно служи за напајање и стабилизацију (слика 12), а друго за појачање сигнала (слика 13).



Слика 12. Део појачавачко-стабилизационе јединице, коло за напајање и стабилизацију напона.

Мерење магнетног поља помоћу магнетоотпорног сензора

У односу на коло за напајање и стабилизацију, коло за појачање сигнала сензора има мало више елемената.

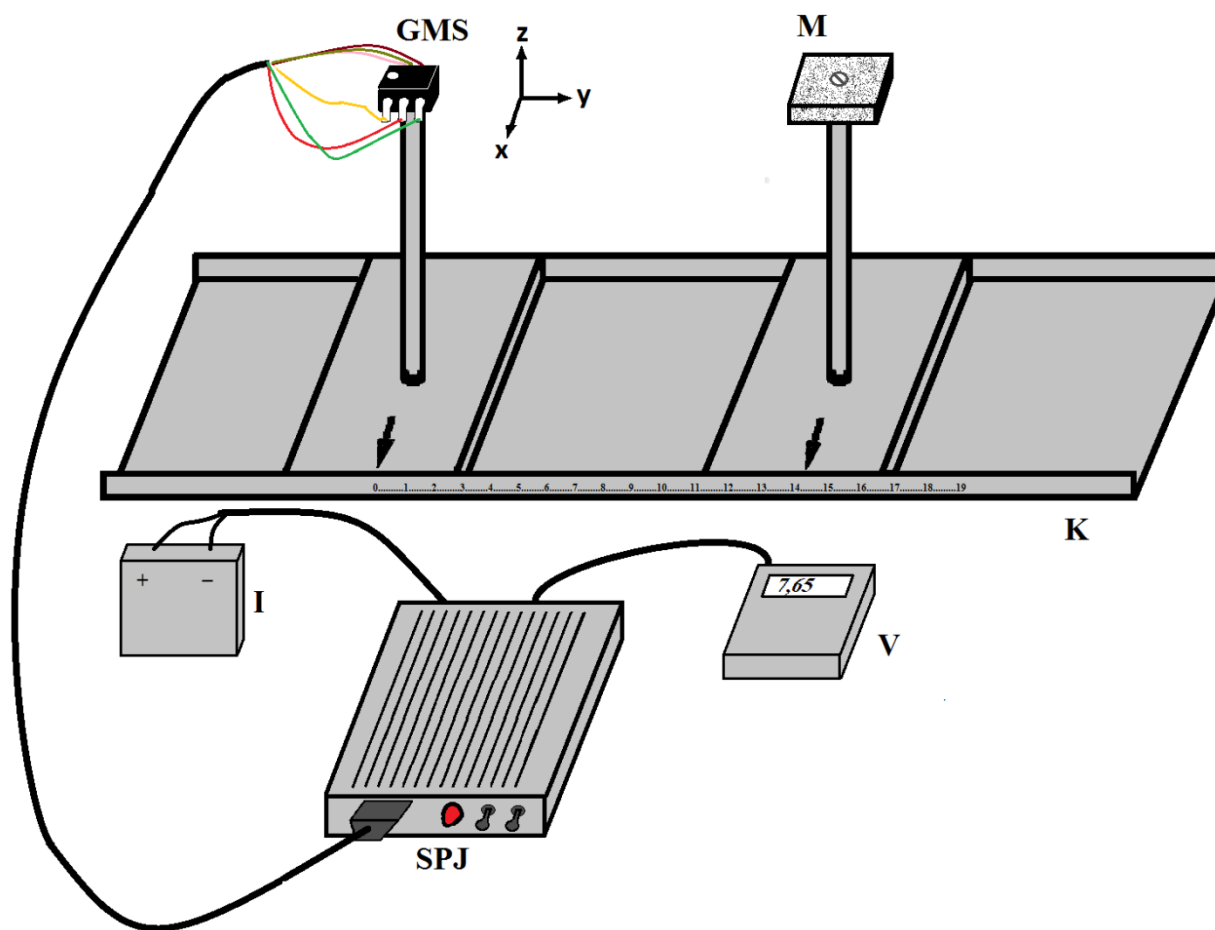


Слика 13. Део појачавачко-стабилизационе јединице, коло за појачање сигнала.

Са обе слике види се да сензор има 6 пинова. Пинови 1 и 2 су заједно уземљени, пинови сензора 3 и 4 су прикључени на појачавачко коло стабилизационо-појачавачке јединице, док су пинови 5 и 6 прикључени на коло које напаја и стабилизује.

4.2. Мерна апаратура

Мерна апаратура (слика 13) се састоји од мерне клупе са мерном траком (K). На клупи су носачи на којем се налазе магнет (M) и сензор (GMS). Сензор (GMS) је повезан са мерним инструментом (V) преко стабилизационо-појачавачком јединицом (SPJ). Улога стабилизационо-појачавачке јединице (SPJ) је да појача сигнал са излаза сензора и да обезбеди стабилан једносмерни напон $\pm 5\text{ V}$ који сензор за оптимални рад и захтева, а цео систем се напаја једносмерним извором напона (I) јачине $\pm 9\text{ V}$.



Слика 13. Мерна апаратура са сензором постављеним тако да мери поље дуж Y-осе

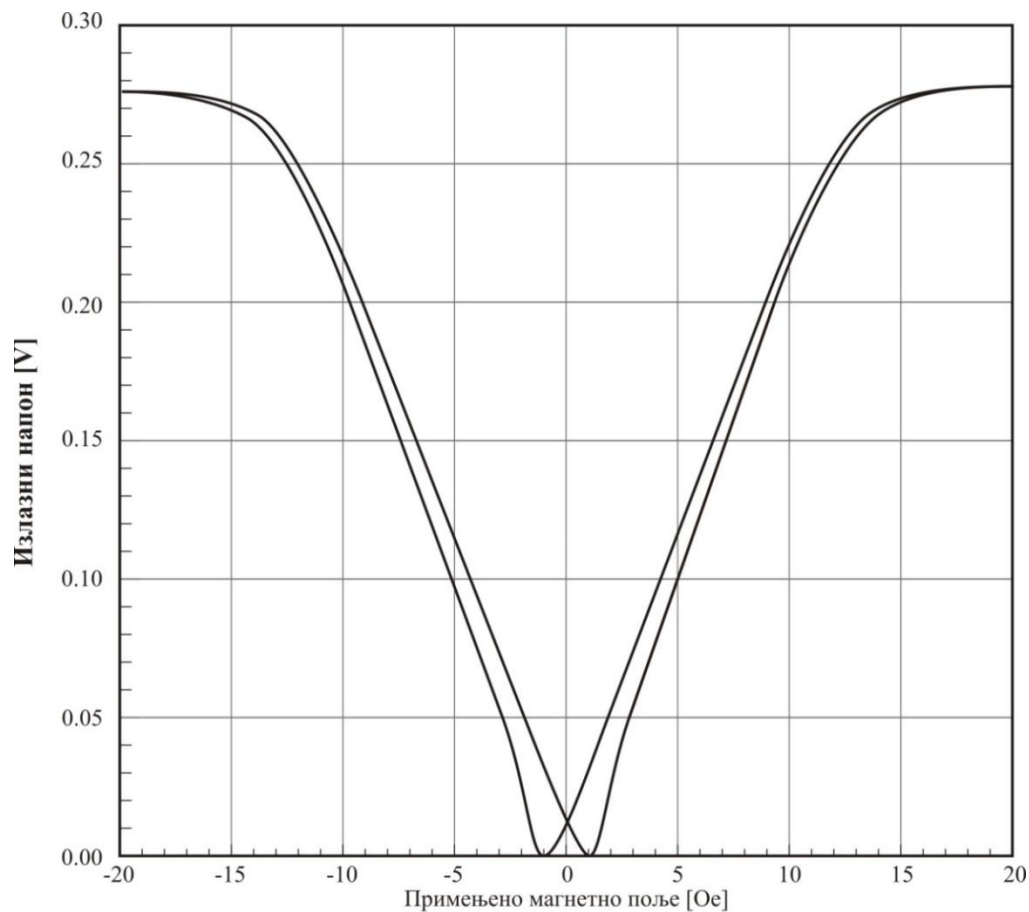
5. Мерење

5.1. Транслација

За различита растојања магнета у односу на сензор посматра се промена напона. Како напон на инструменту није вредност која се добије директно са сензора, већ преко SP јединице потребно је израчунати фактор појачања. По спецификацији произвођача зна се да је максимални излазни напон сензора на собној температури $U_{Smax} = 0,2756 \text{ V}$, њома се дели максимална вредност напона на мерном инструменту U_{Vmax} и тиме се добија израз (16) за фактор појачања F .

$$F = \frac{U_{Vmax}}{U_{Smax}} \quad (16)$$

Знајући овај фактор добија се реални напон на излазу сензора U_s за различита растојања, па лако се може очитати колика је вредност поља са графика који се добије уколико се сензор напаја струјом од 1 mA и при напону напајања 5 V (слика 14).



Слика 14. Калибрациона крива зависности напона на сензору U_s од магнетног поља B , на основу спецификације произвођача.

Мерење магнетног поља помоћу магнетоотпорног сензора

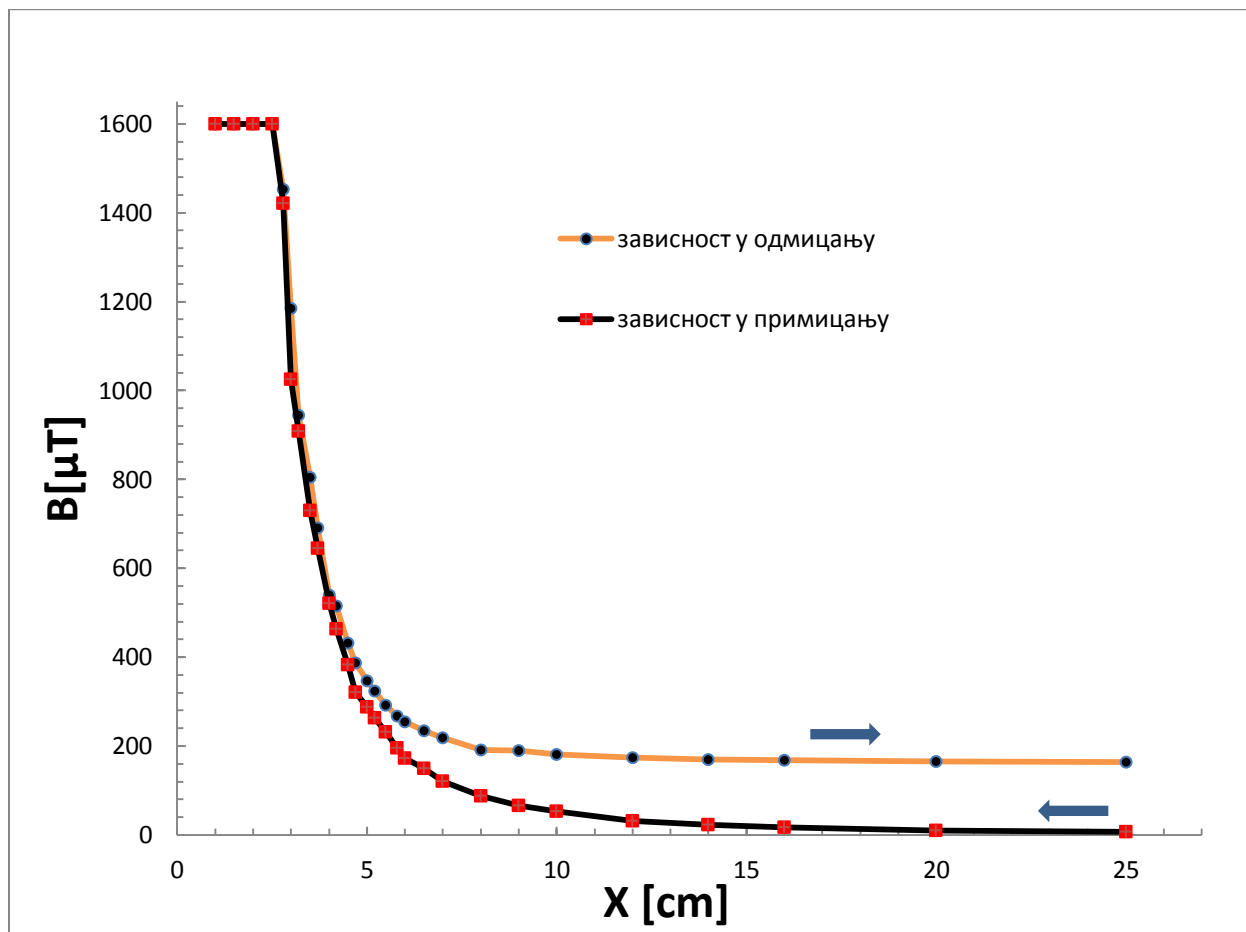
У овом случају фактор појачања се добија као:

$$F = \frac{U_{Vmax}}{U_{Smax}} = \frac{952 \text{ mV}}{275,6 \text{ mV}} = 3,45$$

Резултати индексирани са 1 су добијени при мерењу поља у примицању а са 2 у одмицању и приказани су у табели 1, а графичка зависност на слици 15.

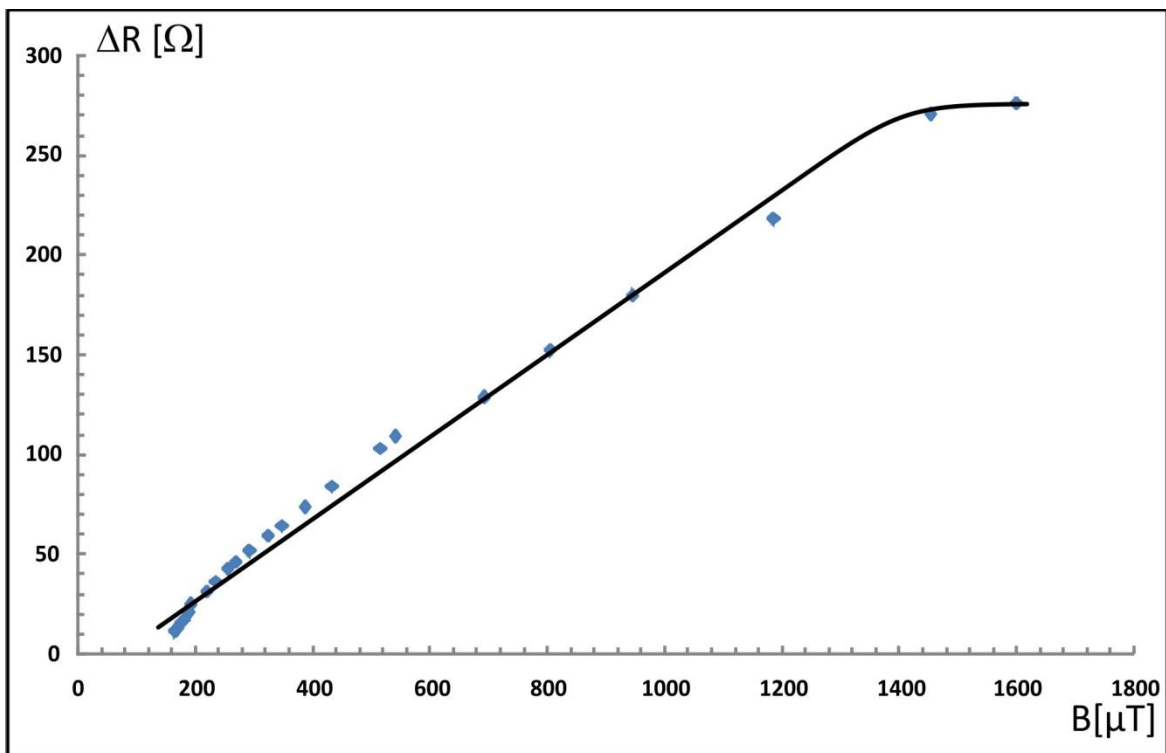
$X[cm]$	$U_{V_1}[mV]$	$U_{V_2}[mV]$	$U_{S_1}[mV]$	$U_{S_2}[mV]$	$B_1[\mu T]$	$B_2[\mu T]$	$\Delta R_1[\Omega]$	$\Delta R_2[\Omega]$
1	952	952	275,6	275,6	1600	1600	275,6	275,6
1,5	952	952	275,6	275,6	1600	1600	275,6	275,6
2	952	952	275,6	275,6	1600	1600	275,6	275,6
2,5	952	952	275,6	275,6	1600	1600	275,6	275,6
2,8	933	935	270,10	270,68	1453,2	1421,3	270,10	270,68
3	752	863	217,70	249,83	1185,1	1025,5	217,70	249,83
3,2	620	725	179,49	209,88	944,7	908,5	179,49	209,88
3,5	525	623	151,99	180,36	804,3	729,8	151,99	180,36
3,7	444	527	128,54	152,56	691,5	644,7	128,54	152,56
4	376	415	108,85	120,14	540,4	521,3	108,85	120,14
4,2	355	373	102,77	107,98	514,9	463,8	102,77	107,98
4,5	289	330	83,66	95,53	431,9	383	83,66	95,53
4,7	254	288	73,53	83,37	387,2	321,3	73,53	83,37
5	221	244	63,98	70,64	346,8	287,2	63,98	70,64
5,2	204	228	59,06	66,01	323,4	263,8	59,06	66,01
5,5	178	194	51,53	56,16	291,5	231,9	51,53	56,16
5,8	159	176	46,03	50,95	268,1	195,7	46,03	50,95
6	147	161	42,56	46,61	255,3	172,3	42,56	46,61
6,5	124	143	35,90	41,40	234,04	148,9	35,90	41,40
7	108	122	31,27	35,32	219,1	121,3	31,27	35,32
8	86	96	24,90	27,80	191,5	87,2	24,90	27,80
9	72	82	20,84	23,74	189,4	66	20,84	23,74
10	60	72	17,37	20,84	180,9	53,2	17,37	20,84
12	53	58	15,34	16,79	174,5	31,9	15,34	16,79
14	47	52	13,61	15,05	170,2	23,4	13,61	15,05
16	44	48	12,74	13,90	168,1	17	12,74	13,90
20	41	44	11,87	12,74	166	10,6	11,87	12,74
25	39	42	11,29	12,16	163,8	6,4	11,29	12,16

Табела 1. Резултати добијени са сензором постављеним тако да мери поље дуж Y-осе

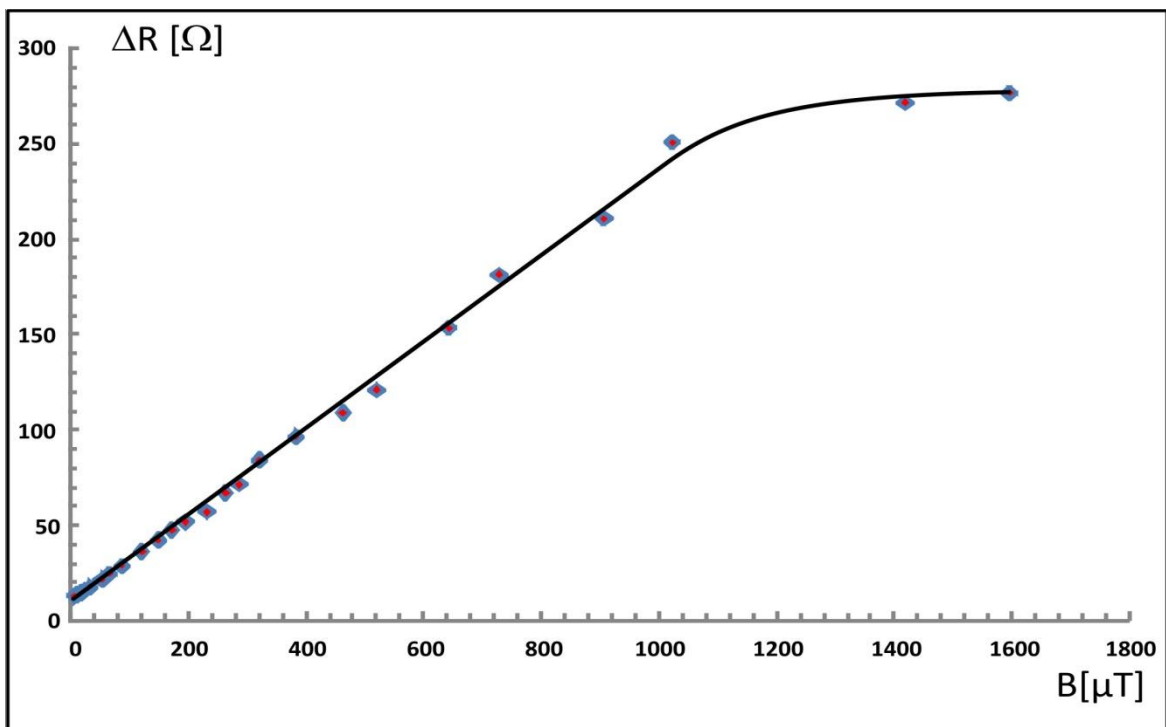


Слика 15. Зависност јачине магнетног поља од растојања у примацању и одмицању дуж Y-осе.

Сам сензор је постављен тако да му је Y-оса постављена паралелно оси линија сила магнета (слика13), а тако постављен и има највећу осетљивост. Као што је и очекивано види се да јачина поља опада са растојањем и да је сензор јако велике осетљивости. Поређења ради, измерена вредност за јачину поља је реда величине неколико μT за разлику од тесламетра са Холовим елементом који мери најмању вредност у хиљадитим деловима тесле, а који је тек почиње да региструје магнетно поље у области где је ГМО сензор већ у сатурацији. Са графика се види и део хистерезисне петље која се јавља јер је сензор доведен у сатурацију при примацању. Поред зависности поља од растојања на следећим графицима види се како изгледа промена отпорности под утицајем магнетног поља (слика 16).



а)



б)

Слика 16. Зависност промене отпорности сензора од јачине магнетног поља растојања у:

а) примицању дуж Y -осе ; б) одмицању дуж Y -осе.

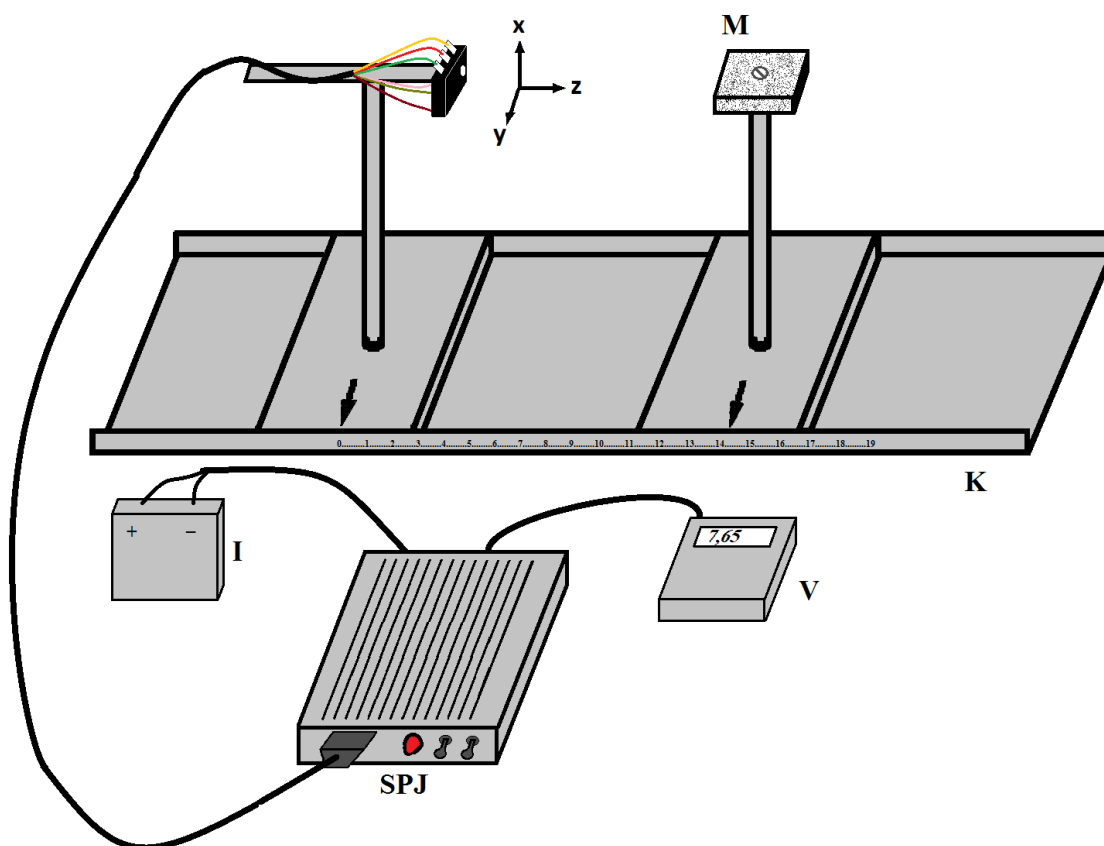
Мерење магнетног поља помоћу магнетоотпорног сензора

Посматрајући зависност отпорности од јачине магнетног поља при одмицању сензора од магнета може се помислити да је отпорност сензора скоро 0Ω за вредност јачине магнетног поља $0 \mu T$, али то није могуће јер у природи не постоји материјал чија је отпорност 0. Уствари при вредности јачине магнетног поља $0 \mu T$ Витстонов мост сензора се налази у равнотежи па се због тога не јавља разлика између референтних и изложених отпорника што се уствари и манифестује као отпорност. Користећи релацију (1), можемо да израчунамо вредности релативне промене специфичне отпорности:

за примицање је $\Delta R = 264,31 \Omega$ док је $R(0)_1 = 11,29 \Omega$ па је $\frac{\Delta R}{R(0)_1} = 24,41$,

а за одмицање е $\Delta R = 263,44 \Omega$ док је $R(0)_2 = 12,16 \Omega$ па је $\frac{\Delta R}{R(0)_2} = 21,66$.

При испитивању рада сензора он је постављан у разне мерне положаје да би се ведело како се сензор понаша при промени правца деловања магнетног поља и види се да при translацији сензор даје незнатно другачије вредности на излазу. Сензор постављен тако да му је Z-оса постављена паралелно оси линија сила магнета (слика 17).



Слика 17. Мерна апаратура са сензором постављеним да мери дуж Z-осе.

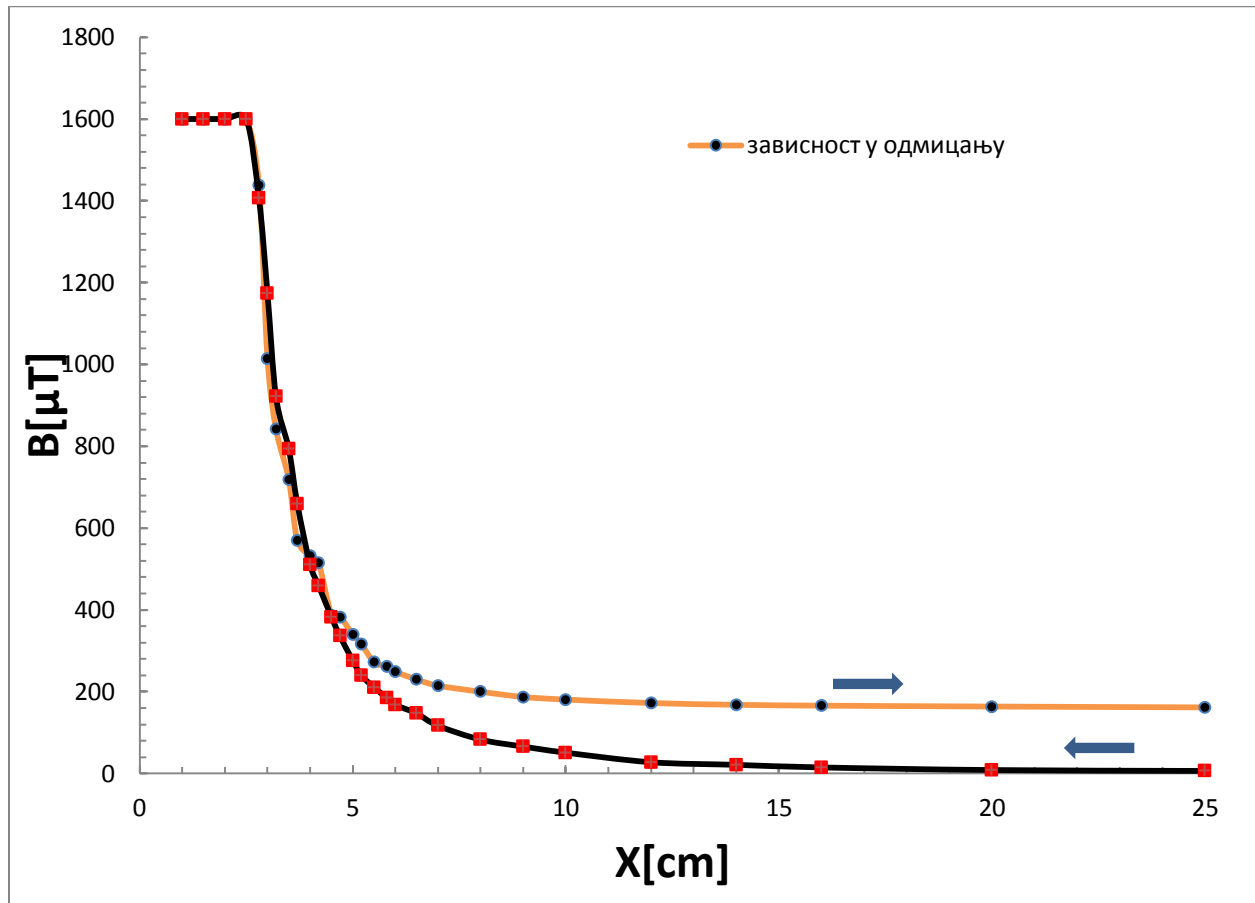
Мерење магнетног поља помоћу магнетоотпорног сензора

Сензор у овом случају мери нешто ниже вредности него код мерења дуж Y-осе. Мерења су вршена како у примицању тако и при одмицању магнета од сензора. Резултати овог мерења су приказани у табели бр.2.

$X[cm]$	$U_{V_1}[mV]$	$U_{V_2}[mV]$	$U_{S_1}[mV]$	$U_{S_2}[mV]$	$B_1[\mu T]$	$B_2[\mu T]$	$\Delta R_1[\Omega]$	$\Delta R_2[\Omega]$
1	952	952	275,6	275,6	1600	1600	275,6	275,6
1,5	952	952	275,6	275,6	1600	1600	275,6	275,6
2	952	952	275,6	275,6	1600	1600	275,6	275,6
2,5	952	952	275,6	275,6	1600	1600	275,6	275,6
2,8	931	933	269,52	270,1	1438,3	1406,38	269,52	270,1
3	749	858	216,83	248,39	1014,9	1174,47	216,83	248,39
3,2	615	707	178,04	204,67	842,5	921,28	178,04	204,67
3,5	517	614	149,67	177,75	719,1	793,62	149,67	177,75
3,7	433	516	125,35	149,38	570,2	659,57	125,35	149,38
4	370	408	107,11	118,11	531,9	510,64	107,11	118,11
4,2	355	371	102,77	107,40	514,9	459,57	102,77	107,40
4,5	255	314	73,82	90,9	387,2	382,98	73,82	90,9
4,7	250	280	72,37	81,06	383	336,17	72,37	81,06
5	217	238	62,82	68,9	340	276,6	62,82	68,9
5,2	199	211	57,61	61,08	317	240,43	57,61	61,08
5,5	161	188	46,61	54,43	272,3	210,64	46,61	54,43
5,8	153	170	44,29	49,21	261,7	185,11	44,29	49,21
6	141	158	40,82	45,74	248,9	168,09	40,82	45,74
6,5	121	141	35,03	40,82	229,8	146,81	35,03	40,82
7	107	119	30,98	34,45	214,9	117,02	30,98	34,45
8	85	94	24,61	27,21	200	82,98	24,61	27,21
9	70	81	20,26	23,45	187,2	65,96	20,26	23,45
10	60	71	17,37	20,55	180,9	51,06	17,37	20,55
12	50	56	14,47	16,21	172,3	27,66	14,47	16,21
14	46	51	13,32	14,76	168,1	21,28	13,32	14,76
16	43	47	12,45	13,61	166	14,89	12,45	13,61
20	40	43	11,58	12,45	163,8	8,51	11,58	12,45
25	38	41	11	11,87	161,7	6,38	11	11,87

Табела 2. Резултати добијени са сензором постављеним да мери дуж Z-осе

Графичка зависност је дата на слици 18.

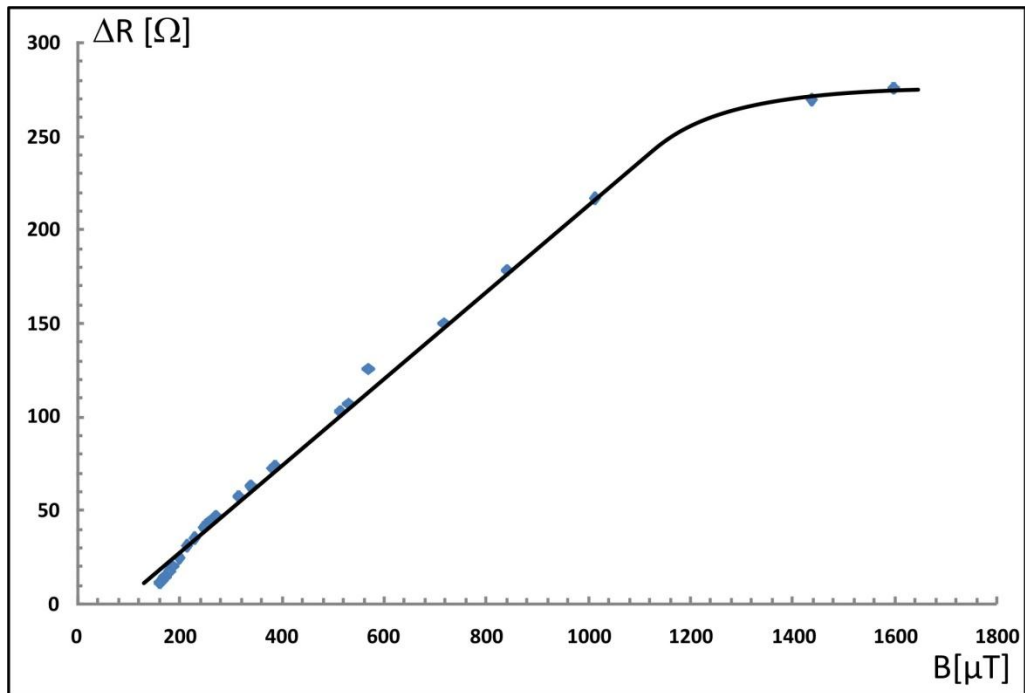


Слика 18. Зависност јачине магнетног поља од растојања при мерењу дуж Z-осе .

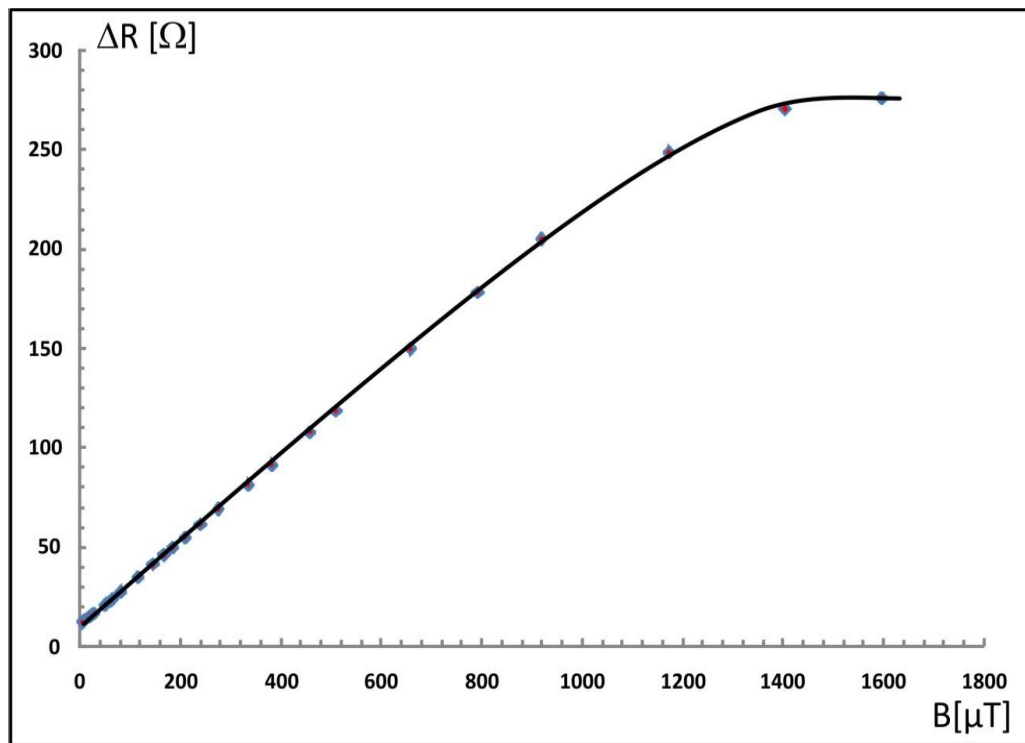
Сама графичка зависност не мења пуно изглед осим што се јавља преплитање кривих што није случај за мерење дуж Y-осе па се по томе може закључити да мерење у овом положају није адекватно. Као и при мерењу дуж Y-осе види се да се јавља пораст отпорности при повећању вредности јачине магнетног поља (слика 19). Вредности релативне промене специфичне отпорности износе:

за примикање $\Delta R = 264,6 \Omega$ док је $R(0)_1 = 11 \Omega$ па је $\frac{\Delta R}{R(0)_1} = 24,05$,

а за одмицање $\Delta R = 263,73 \Omega$ док је $R(0)_2 = 11,87 \Omega$ па је $\frac{\Delta R}{R(0)_2} = 22,22$



а)



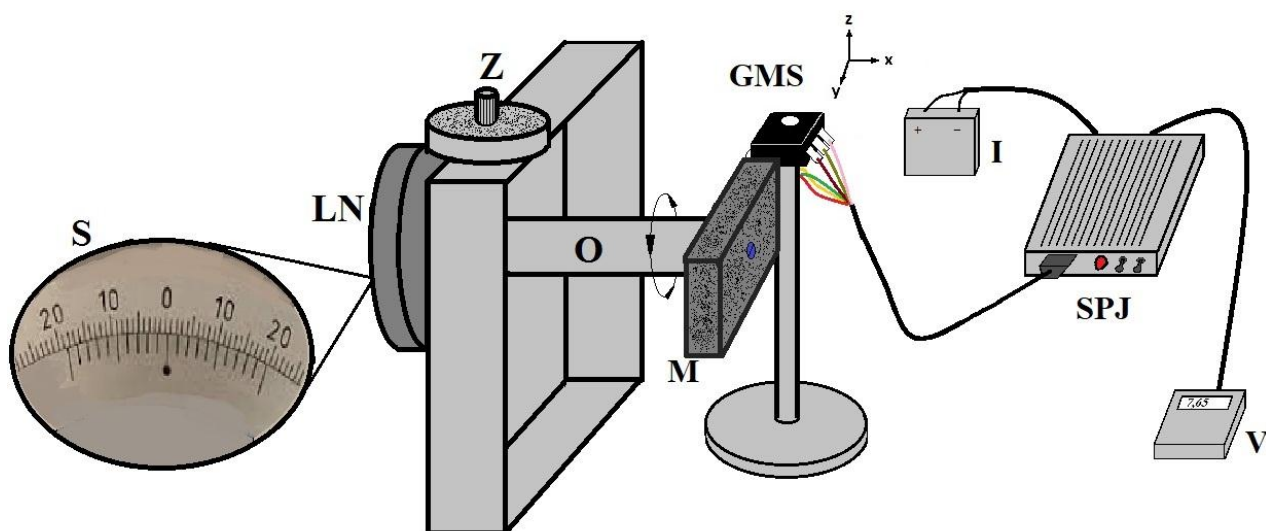
б)

Слика 19. Зависност промене отпорности сензора од јачине магнетног поља растојања у:
а) примицању дуж Z-осе ; б) одмицању дуж Z-осе

Како се резултати при мерењу поља дуж X-осе не разликују пуно од оних при мерењу дуж Z-осе, исти нису ни представљени у овом раду.

5.2. Ротација

Модификацијом апаратуре постоји могућност праћења промене јачине магнетног поља у зависности од угла (слика20). Мерни део апаратуре остаје исти, а клупу у овом случају мења ротациони носач. На осовину (O) се фиксира магнет (M) чије се поље жели мерити, а завртњем (Z) се подешава угао који се читава на скали (S) лучног нониуса (LN).



Слика 20. Мерна апаратура за мерење магнетног поља при ротацији магнета
(мерење вршено дуж Y-осе)

Приликом мерења може се јавити проблем центрирања приликом фиксирања магнета на осовину. Због осетљивости сензора, било какво мало одступање од правилне осе обртања магнета даје резултате који нису у складу са теоријом, међутим уз мали напор и употребу катетометра тај проблем се добрим делом може превазићи. Поред центрирања, при фиксирању магнет треба поставити тако да сензор не улази у сатурацију како би при мерењу углова графичка зависност била веродостојнија. Растојање сензора од магнета је $L = 2,5 \text{ cm}$, а мерење јачине поља у зависности од угла је вршено са кораком од 15° .

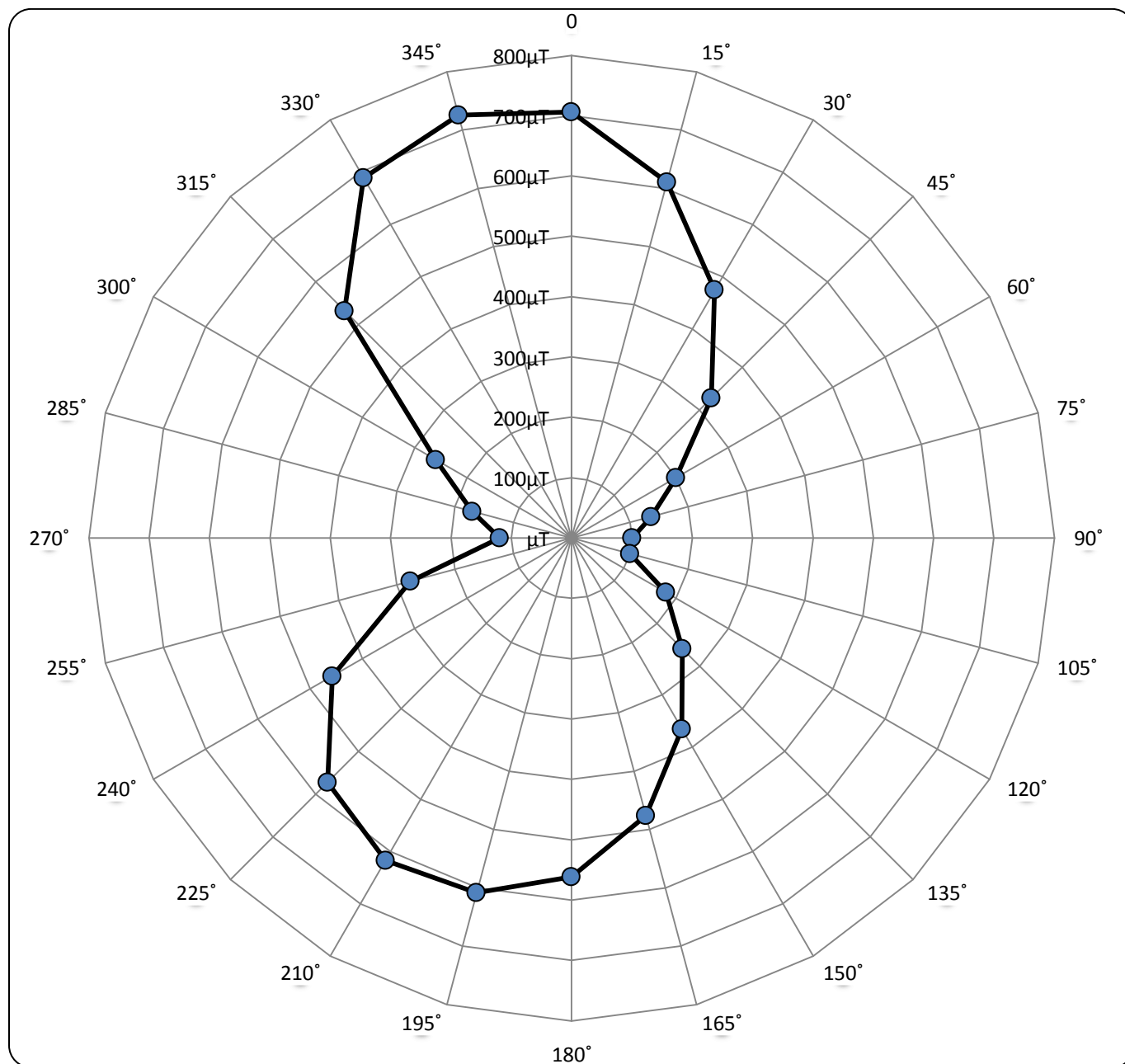
Мерење магнетног поља помоћу магнетоотпорног сензора

Резултати мерења су приказани у табели 3.

$\alpha [^\circ]$	$U_V [mV]$	$U_S [mV]$	$B [Oe]$	$B [\mu T]$	$\Delta R [\Omega]$
0	503	146,6472	7,06383	706,383	146,6472
15	428	124,7813	6,106383	610,6383	124,7813
30	324	94,46064	4,744681	474,4681	94,46064
45	205	59,76676	3,276596	327,6596	59,76676
60	86	25,07289	2	200	25,07289
75	11	3,206997	1,361702	136,1702	3,206997
90	0	0	1	100	0
105	0	0	1	100	0
120	59	17,20117	1,808511	180,8511	17,20117
135	147	42,85714	2,595745	259,5745	42,85714
150	234	68,22157	3,659574	365,9574	68,22157
165	321	93,58601	4,765957	476,5957	93,58601
180	385	112,2449	5,617021	561,7021	112,2449
195	424	123,6152	6,085106	608,5106	123,6152
210	431	125,656	6,170213	617,0213	125,656
225	397	115,7434	5,723404	572,3404	115,7434
240	306	89,21283	4,574468	457,4468	89,21283
255	164	47,81341	2,765957	276,5957	47,81341
270	1	0,291545	1,191489	119,1489	0,291545
285	45	13,11953	1,702128	170,2128	13,11953
300	149	43,44023	2,595745	259,5745	43,44023
315	365	106,414	5,319149	531,9149	106,414
330	488	142,2741	6,893617	689,3617	142,2741
345	518	151,0204	7,255319	725,5319	151,0204
360	503	146,6472	7,06383	706,383	146,6472

Табела 3. Резултати мерења магнетног поља при ротацији магнета (мерење дуж Y-осе)

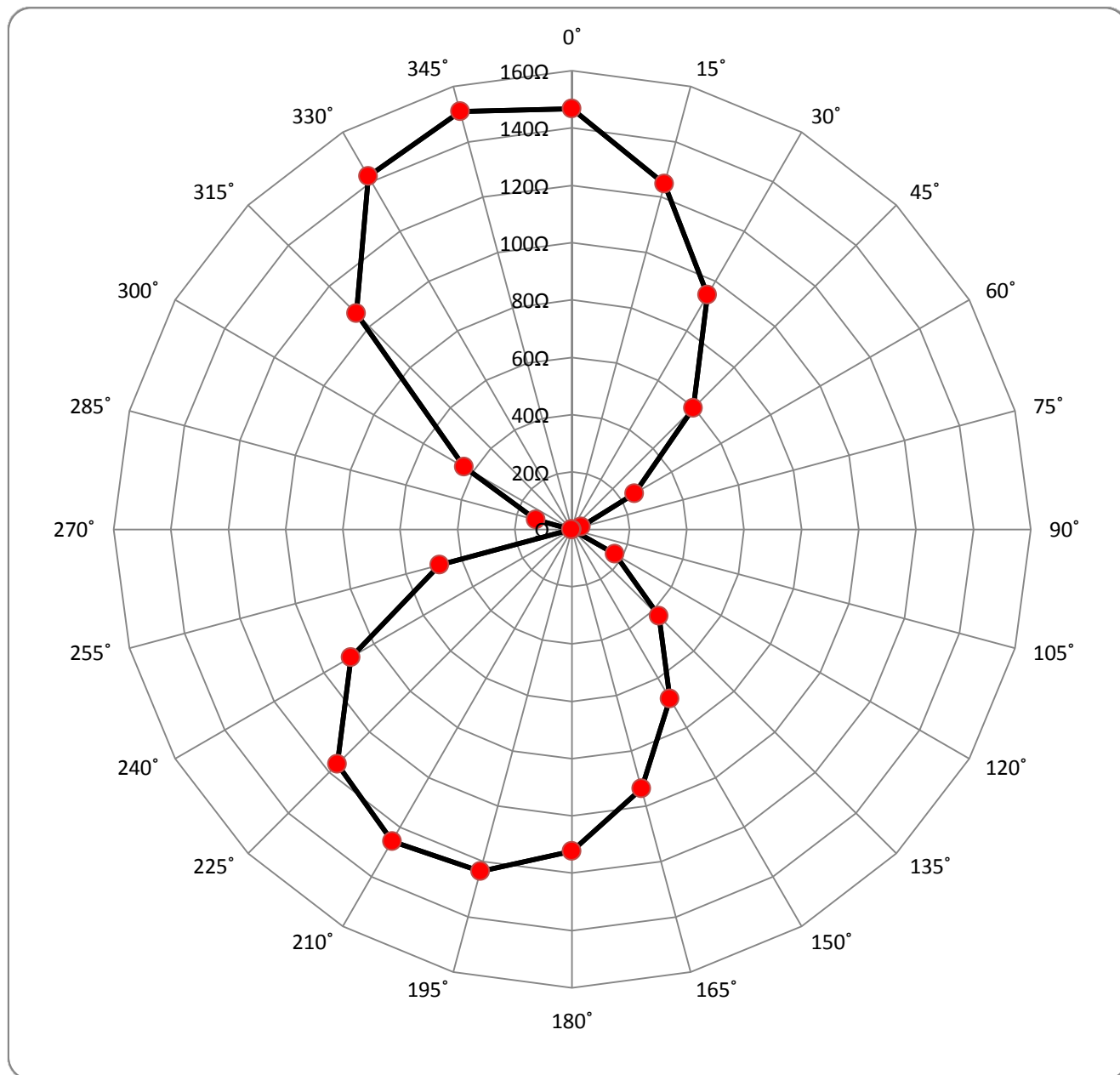
Као што је горе напоменуто проблем центрирања је "добрим делом" превазиђен, међутим са графика се може видети да није потпуно превазиђен јер је очекивана "осмица" зависности јачине поља од угла, благо закривљена у леву страну (слика 21).



Слика 21. Зависност јачине магнетног поља $B[\mu\text{T}]$ од угла $\alpha[^\circ]$ (мерење дуж Y-осе)

Мерење магнетног поља помоћу магнетоотпорног сензора

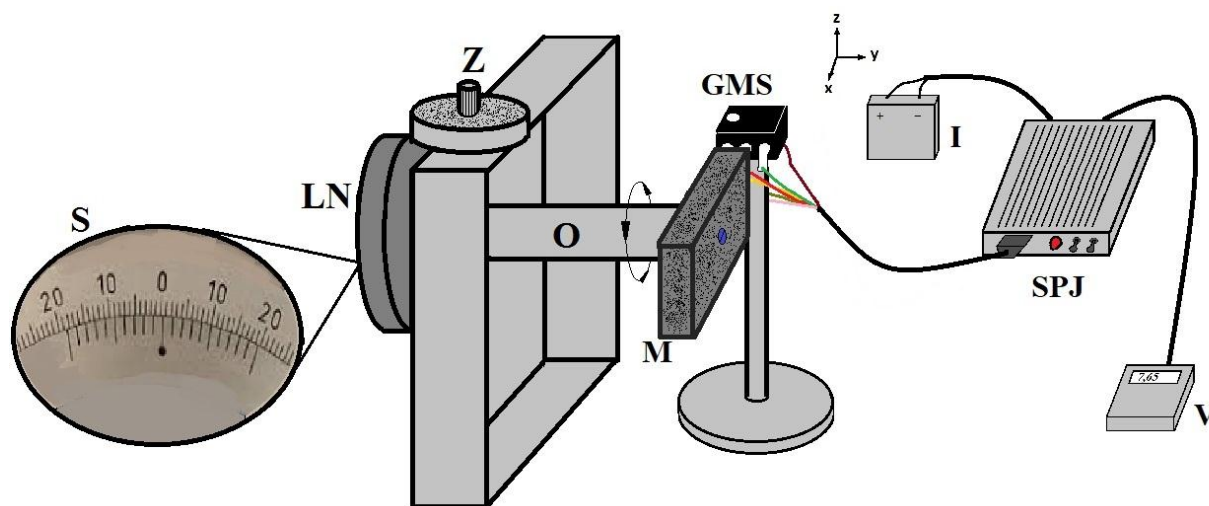
На слици 22. се може видети како изгледа зависност промене отпора од угла за дате вредности јачине магнетног поља. Вредност релативне промене специфичне отпорности нема смисла рачунати јер измерена вредност специфичне отпорности без поља износи $R(0) = 0$, а то би значило да је $\frac{\Delta R}{R(0)} = \infty$, што наравно није могуће.



Слика 22. Зависност промене отпорности сензора $\Delta R[\Omega]$ од угла $\alpha[^\circ]$ под утицајем датог магнетног поља (мерење дуж Y-осе)

Мерење магнетног поља помоћу магнетоотпорног сензора

И код ротације је мерена јачина поља дуж различитих оса сензора (слика 23). Проблем центрирања је у овом случају занемарљив јер се показало да се резултати добијени при мерењу дуж X и Z-осе свакако не слажу са очекиваним вредностима. Растојање сензора од магнета и у овим случајевима износи $L = 2,5 \text{ cm}$



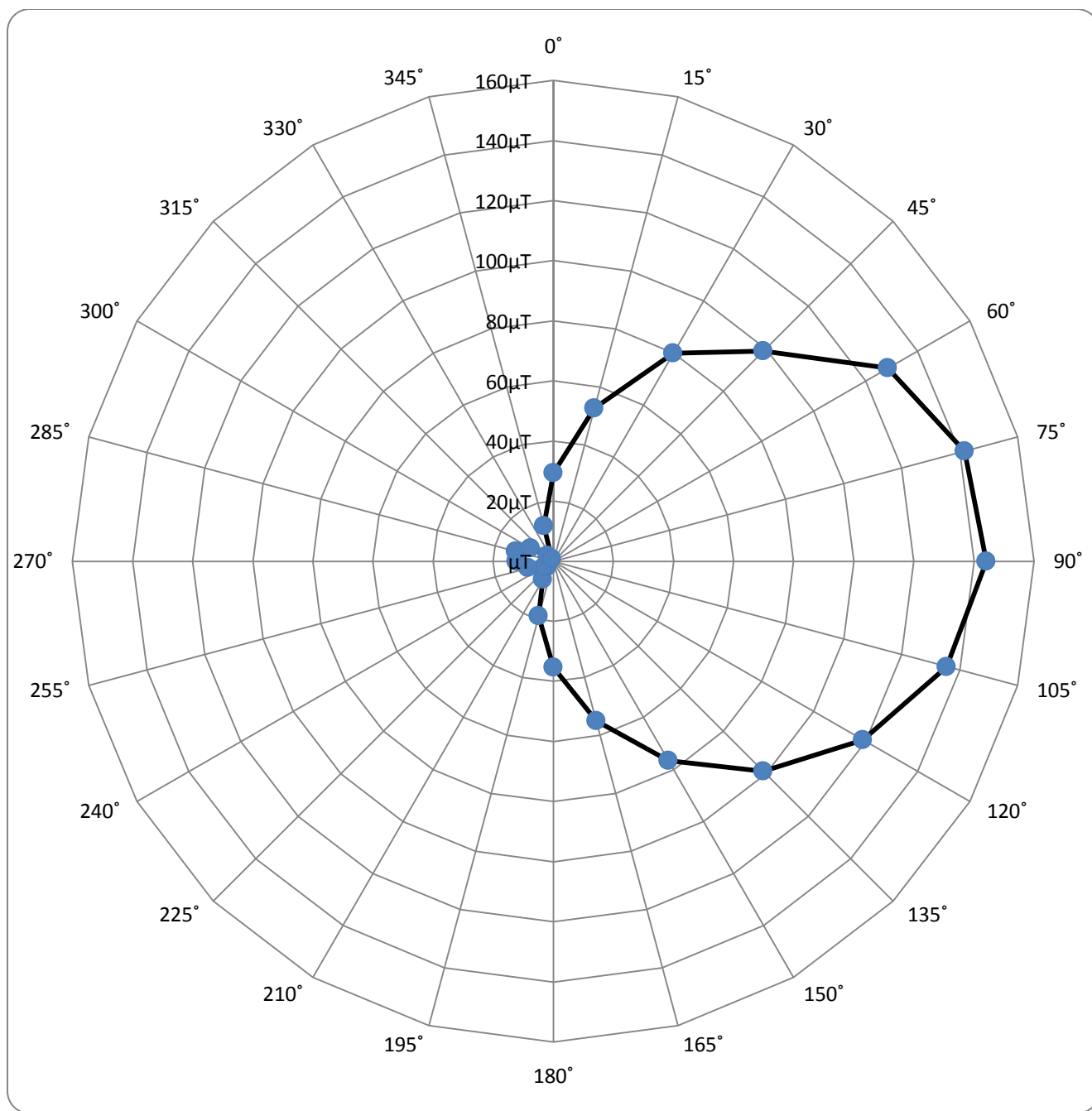
Слика 23. Мерна апаратура за мерење магнетног поља при ротацији магнета (мерење вршено дуж X-осе)

Добијени резултати при оваквој поставци апаратуре су приказани у табели 4. Резултати при мерењу јачине поља дуж Z-осе се не разликују пуно од оних при мерењу дуж X-осе као и код translације због чега нису ни приказани.

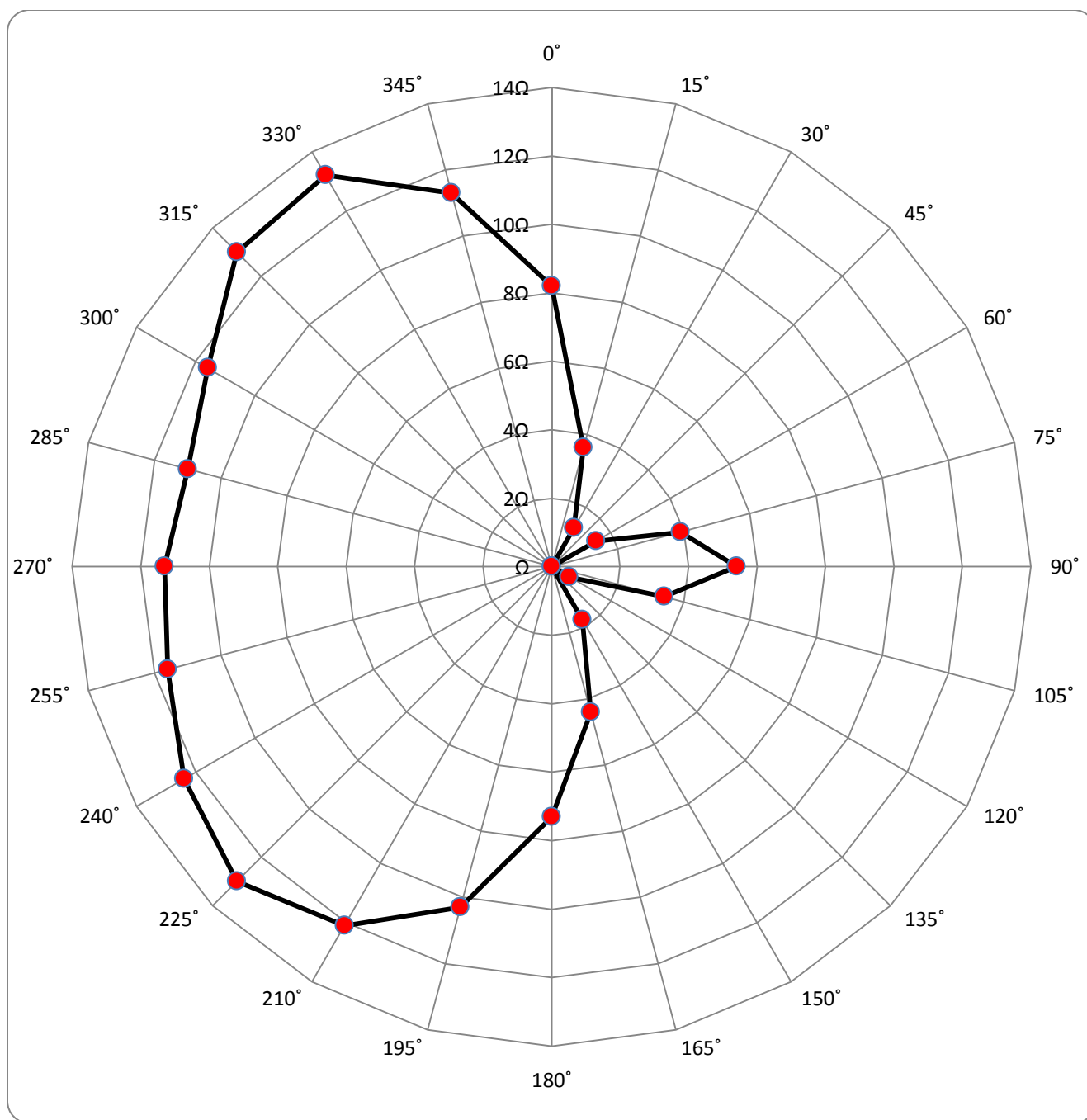
$\alpha[^\circ]$	$U_V[mV]$	$U_S[mV]$	$B[Oe]$	$B[\mu T]$	$\Delta R[\Omega]$
0	28,29	8,2	0,294461	29,44606	8,2
15	12,42	3,6	0,527697	52,76968	3,6
30	4,485	1,3	0,798834	79,88338	1,3
45	0	0	0,988338	98,83382	0
60	5,175	1,5	1,285714	128,5714	1,5
75	13,455	3,9	1,41691	141,691	3,9
90	18,63	5,4	1,440233	144,0233	5,4
105	11,73	3,4	1,355685	135,5685	3,4
120	2,07	0,6	1,189504	118,9504	0,6
135	0	0	0,988338	98,83382	0
150	6,21	1,8	0,766764	76,67638	1,8
165	15,18	4,4	0,55102	55,10204	4,4
180	25,185	7,3	0,35277	35,27697	7,3
195	35,535	10,3	0,189504	18,95044	10,3
210	41,745	12,1	0,069971	6,997085	12,1
225	44,85	13	0,026239	2,623907	13
240	42,78	12,4	0,034985	3,498542	12,4
255	40,02	11,6	0,087464	8,746356	11,6
270	38,985	11,3	0,122449	12,2449	11,3
285	37,95	11	0,12828	12,82799	11
300	40,02	11,6	0,087464	8,746356	11,6
315	44,85	13	0,026239	2,623907	13
330	45,54	13,2	0,008746	0,874636	13,2
345	38,985	11,3	0,122449	12,2449	11,3
360	28,29	8,2	0,294461	29,44606	8,2

Табела 4. Резултати мерења магнетног поља при ротацији магнета (мерење дуж X-осе)

При оваквом мерењу види се да је један део зависности драстично смањен и то толико да се скоро и не види (слика 24). Зависност промене отпорности од јачине магнетног поља понаша у овом случају инверзно, тј при порасту јачине магнетног поља промена отпорности се смањује (слика 25), што наводи на закључак да је као и код транслације, употреба сензора дуж било које осе осим Y неадекватна за мерење. Ово се дешава јер су вредности напона у области где је магнетно поље у негативној вредности. Као и у претходној поставци, рачунање вредности релативне промене специфичне отпорности нема смисла јер измерена вредност специфичне отпорности без поља износи $R(0) = 0$



Слика 24. Зависност јачине магнетног поља B [μT] од угла α [°] (мерење дуж X-осе)



Слика 25. Зависност промене отпорности сензора ΔR [Ω] од угла α [°] под утицајем датог магнетног поља (мерење дуж X-осе)

6. Закључак

Приликом реализације апаратуре, постојала је идеја да се калибрациона крива добије мерењем поља тесламетром са Холовим елементом, али се показало да је то неизводљиво јер реализована апаратура мери врло ниске вредности јачине магнетног поља са врло великом осетљивошћу, реда величине неколико μT за разлику од тесламетра са Холовим елементом који мери најмању вредност у хиљадитим деловима тесле, а који је тек почиње да региструје магнетно поље у области где је ГМО сензор већ у сатурацији. У циљу детаљнијег испитивања рада сензора он је постављан да мери дуж све три осе. Из тих мерења закључено је да је сензор најупотребљивији ако се постави да мери дуж Y-осе и да за остале две осе сензор региструје промене, али не са тако великом прецизношћу и поузданошћу. Реализована апаратура представља уређај за прецизно мерење јачине магнетног поља врло ниских вредности, што је само једна од бесконачно могућности примене магнетоотпорности.

Чињеница је да ће магнетоотпорност као ефекат у разним облицима бити и надаље предмет научног и технолошког истраживања и усавршавања јер има огроман потенцијал примене у технологији, индустрији, медицини и у свакодневном животу.

7. Литература

- [1] Магнет „Хрватска енциклопедија“ лексикографски завод Мирослав Крлежа www.enciklopedija.hr, 2014
- [2] Sanford P. Bordeau, „Volts to Hertz...the Rise of Electricity“. Burgess Publishing Company, Minneapolis, MN. pp.86–107, ISBN 0-8087-4908-0(1982)
- [3] Georg Simon Ohm, „Die Galvanische Kette, Mathematisch Bearbeitet“, Berlin 1827.
- [4] Hart, Ivor B. „Makers of Science“. London, Oxford University Press, p. 243. 1923.
- [5] A.B. Pippard: „Magnetoresistance in Metals“, Cambridge University Press (1989)
- [6] M.s. Dresselhaus: *Solid State Physics – Part I, Transport Properties of Solids*, Lecture notes, MIT, Cambridge, Massachusetts, USA, 2001.
- [7] С.Лукић, Д. Петровић, Ф. Скубан, Г. Штрбац, И. Гут, „Експерименталне технике карактеризације материјала: термичке, електричне, диелектричне и магнетне“, Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Департман за физику, Нови Сад 2015.
- [8] McGuire, T.; Potter, R. "Anisotropic magnetoresistance in ferromagnetic 3d alloys" IEEE Transactions on Magnetics. 11 (4): 1018–1038. (1975).
- [9] M . Baibich Phys. Rev. Lett. 61, 2472 (1988)
- [10] J. Nickel: *Magnetoresistance Overview*, Hewlett-Packard Laboratories, Technical Publications Department, 1995.
- [11] S. Jin et al., Science 264, 413 (1995).
- [12] M. Julliere, "Tunneling between ferromagnetic films". Phys. Lett. 54A: 225–226 (1975).
- [13] S Yuasa; T Nagahama; A Fukushima; Y Suzuki & K Ando "Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions". Nat. Mat. 3 (12): 868–871(2004).
- [14] GMR Sensor catalog, NVE Corporation www.nve.com

Кратка биографија кандидата



Борис Бањац је рођен 23. 10. 1986. године у Новом Саду. Основно образовање је 2001 године завршио у родном граду у школи „Јожеф Атила“. Исте године је уписао средњу електро-техничку школу „Михајло Пупин“ смер електротехничар аутоматике, коју је завршио 2005. године са одличним успехом. Школске године 2005/06. уписао је Природно–математички факултет у Новом Саду, смер медицинска физика. Од 2012 године запослен је на природно-математичком факултету као технички сарадник. Оженио се 2016. године, а исте године је постао и отац ћерке Магдалене.

Нови Сад, март 2018

Борис Бањац

Мерење магнетног поља помоћу магнетоотпорног сензора

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ, ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број:

РБР

Идентификациони број:

ИБР

Тип документације:

Монографска документација

ТД

Тип записа:

Текстуални штампани материјал

ТЗ

Врста рада:

Дипломски рад

ВР

Аутор:

Борис Бањац

АУ

Ментор:

Др Федор Скубан

МН

Наслов рада:

Мерење магнетног поља помоћу магнетоотпорног сензора

НР

Језик публикације:

српски (ћирилица)

ЈП

Језик извода:

српски/енглески

ЈИ

Земља публикавања:

Република Србија

ЗП

Уже географско подручје:

Војводина

УГП

Година:

2018

ГО

Издавач:

Ауторски репринт

ИЗ

Место и адреса:

Природно-математички факултет, Трг Доситеја Обрадовића 4, Нови Сад

МА

Физички опис рада:

7/42/0/25/4

ФО

Научна област:

Физика

НО

Научна дисциплина:

Физика чврстог стања

НД

Предметна одредница/

Магнетоотпорност, мерење јачине магнетног поља, магнетоотпорни

кључне речи:

сензори

ПО

УДК

Чува се:

Библиотека департмана за физику, ПМФ-а у Новом Саду

ЧУ

Важна напомена:

Нема

ВН

Извод:

У овом раду анализиран је ефекат магнетоотпорности поткрепљен како теоријски досадашњим теоријским сазнањима тако и експериментално где је мерена јачина магнетног поља употребом сензора на бази гигантске магнетоотпорности. Рад приказује практичну употребу индустријског сензора у лабораторијским условима и показује могућу примену у реализацији наставе.

ИЗ

Мерење магнетног поља помоћу магнетоотпорног сензора

Датум прихватања теме од

НН ећа:

19.03.2018.

ДП

Датум одбране:

21.03.2018.

ДО

Чланови комисије:

КО

Председник:

Др Имре Гут,

Природно–математички факултет, Нови Сад

члан:

Др Федор Скубан, редовни проф.

Природно–математички факултет, Нови Сад

члан:

Др Маја Стојановић,

Природно–математички факултет, Нови Сад

UNIVERSITY OF NOVI SAD, FACULTY OF SCIENCES

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

Monograph publication

DT

Type of record:

Textual printed material

TR

Content code:

Final paper

CC

Author:

Boris Banjac

AU

Mentor/comentor:

Ph. D. Fedor Skuban, full prof.

MN

Title:

Measurement of the magnetic field using a magnetoresistance sensor

TI

Language of text:

Serbian (Cyrillic)

LT

Language of abstract:

English

LA

Country of publication:

Republic of Serbia

CP

Locality of publication:

Vojvodina

LP

Publication year:

2018

PY

Publisher:

Author's reprint

PU

Publication place:

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

PP

Physical description:

7/42/0/25/4

PD

Scientific field:

Physics

SF

Scientific discipline:

Physics of solide state

SD

Subject/ Key words:

Magnetoresistance, measuring magnetic field strength, sensors based on the effect of magnetoresistance

SKW

UC

Holding data:

Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

HD

Note:

None

N

Abstract:

AB

In this paper, the effect of magnetoresistance is corroborated both theoretically by theoretical knowledge and experimental by measuring magnetic field strength using sensors based on the effect of magnetoresistance. The paper presents the practical use of industrial sensors in laboratory conditions and shows possible application in the realization of teaching

Мерење магнетног поља помоћу магнетоотпорног сензора

Accepted by the Scientific Board: 19.03.2018.

ASB

Defended on: 21.03.2018.

DE

Thesis defend board:

DB

President:

Ph. D. Imre Gut,
full professor Faculty of Sciences, Novi Sad

Member:

Ph. D. Fedor Skuban,
associate professor Faculty of Sciences, Novi Sad

Member:

Ph. D. Maja Stojanović,
full professor Faculty of Sciences, Novi Sad