

# Magnetska mjerenja

---

Varga, Mario

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:602239>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-15**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Stručni studij**

**MAGNETSKA MJERENJA**

**Završni rad**

**Mario Varga**

**Osijek, 2019.**

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. ZAHTJEVI MJERENJA.....	3
2.1. Akcelatorski magneti.....	3
2.2. Detektorski magneti .....	4
2.3. Izbor metode mjerenja.....	4
3. MJERNE METODE.....	5
3.1. “Fluxmeter” metoda .....	5
3.1.1. Indukcijske zavojnice .....	6
3.1.2. Mjerenje toka.....	7
3.2. Metoda Hall-ovog generatora .....	9
3.2.3. Kalibriranje.....	10
3.3. Tehnika magnetske rezonance .....	11
3.4. „Fluxgate“ magnetometar .....	11
3.5. Magnetootpornički efekt .....	12
3.6. Mapiranje vizualnog polja .....	12
3.6.4. Faraday-ev efekt .....	12
4. DEFINICIJA GEOMETRIJE POLJA .....	13
4.1. 2-polna geometrija.....	13
4.2. višepolna geometrija .....	14
5. MAGNETSKI SENZORI I SIGNALI.....	15
5.1. Općenito o magnetskim sensorima .....	15
5.2. Hall-ov senzor .....	16
5.3. Magnetootpornički senzori .....	19
5.3.1. Anizotropni magnetootpornik (AMR).....	20
5.3.2. Gigantski magnetootpornik (GMR).....	22
5.3.3. Tunelski magnetootpornik (TMR).....	26

5.4. Senzori indukcijske zavojnice .....	27
5.5. „Fluxgate“ senzori .....	31
5.6. Senzor nuklearne magnetske rezonance (NMR) .....	32
5.7. „SQUID“ magnetometri .....	33
6. TOČNOST MJERENJA .....	36
6.1. Klasifikacija pogreške i izvor nesigurnosti.....	37
6.2. ISO klasifikacija.....	37
6.3. Sistematska klasifikacija.....	39
7. ZAKLJUČAK .....	41
8. LITERATURA .....	42
9. SAŽETAK .....	45
10. ABSTRACT .....	46
11. ŽIVOTOPIS .....	47

## 1.UVOD

Hans Christian Oersted je otkrio elektromagnetizam u lipnju 1820. godine. On je proučavao kako je električna struja u platinastoj žici, postavljena paralelno i u blizini igle magnetskog kompasa utjecala na očitavanje kompasa. Do rujna iste godine Andre-Marie Ampere je već formulirao kvantni zakon elektromagnetizma. Ubrzo nakon, Michael Faraday je otkrio elektromagnetsku indukciju 1831. godine. Ovaj događaj je obilježio početak tehnologije magnetskih mjerenja.

Uređaji bazirani na magnetskom polju su korišteni za navigiranje, generiranje elektriciteta, pretvaranje električne energije u mehaničku energiju, kontroliranje svemirskih letjelica i za ostale uporabe koje olakšavaju svakodnevni život. To znači da su različite tehnike korištene kako bi se što točnije mogli izmjeriti slabo magnetsko polje koje stvara mozak i jaka magnetska polja generirana preko superkonduktivnih magneta. Mjerni uređaji su podijeljeni u dvije kategorije: vektorski i skalarni. Instrumenti koji mjere vektorsku veličinu magnetskog polja i smjer koriste iznimno osjetljive superkonduktivne kvantne uređaje zvani (SQUID) magnetometri koji se koriste za mjerenje manjih promjena u magnetskom polju; robusni i pouzdani fluxgate magnetometri koji su se našli korisnim kod mjerenja slabog magnetskog polja opće namjene; i magnetometri s Hall-ovim efektom koji mogu mjeriti iznimno jaka magnetska polja. Postoje i novi senzori uključeni u ovu kategoriju bazirani na anizotropnoj magnetskoj otpornosti (AMR) i magnetostriksijski (magnetometri s optičkim vlaknima) [1,2]. Detaljni opis prije navedenih metoda mjerenja se mogu naći u [3].

Skalarni magnetometri koji mjere samo veličinu magnetskog polja zovu se nuklearni magnetski rezonantni (NMR) magnetometri, zbog toga što radi na principu koji ovisi o rezonantnom fenomenu protona ili elektrona. U ovu kategoriju još spadaju i protonsko precesijski, helijski i alkalno-parni magnetometri. Ovi NMR magnetometri služe kao primarni standard u mjerenju magnetskog polja.

Magnetsko polje je osnovna imovina Zemlje, sunca i puno drugih planeta našeg solarnog sustava i drugdje u svemiru. Ljudi koriste magnetska polja za navigaciju, za stvaranje rotacijskog i linearnog gibanja, za generiranje električne snage, za liječenje, za pomicanje objekata, za pregled ljudskog tijela, za mjerenje brzine automobila, za detektiranje zakopanih predmeta, za navođenje projektila, za pretvaranje električne struje u zvuk i obrnuto, za pohranjivanje informacija i tako dalje. Također postoji čvrsti dokaz da životinje koriste magnetsko polje za navigaciju.

Pokretni električni naboj stvara magnetsko polje, bilo da elektroni teku žicom (električna struja), ioni teku u fluidu, bilo da se elektroni gibaju u nukleusu atoma ili da se proton vrti. Kao gravitacija, magnetsko polje stvara promjene u daljini zbog toga što se njen utjecaj širi dalje od same površine izvora. Magnetsko polje je vektorska veličina jer se sastoji od dvije veličine a to su: jačina magnetskog polja i smjer. Instrumenti za mjerenje magnetskog polja mjere jednu ili obje veličine.

U ovome radu ću sve instrumente za mjerenje magnetskog polja oslovljavati kao magnetometre, iako se još koristi i naziv „gaussometar“ za takve uređaje. Tablica 1 sadrži karakteristike o nekoliko tipova magnetometara. Suvremeni praktični magnetometri se mogu podijeliti u 2 razreda: 1. vektorski

### 2. skalarni tip

Vektorski magnetometar kao što mu ime kaže „mjeri i jačinu magnetskog polja i smjer dok skalarni magnetometar mjeri samo jačinu magnetskog polja.

Tablica 1. karakteristike magnetometara

Tip	Širina polja	Širina frekvencije	Karakteristike
Fluxgate	100 pT- 200 $\mu$ T	DC–2 kHz	Manja snaga, robusan, širi raspon temperature i manji po veličini
Indukcijski svitak	1 fT–1 T	0.01 Hz–1 MHz	Manja snaga, velika širina polja, velika širina frekvencije i robusan
SQUID	1 pT–100 $\mu$ T	DC–10 Hz	Najveća osjetljivost ali zahtjeva kriogeni aparat
AMR	5 nT–200 $\mu$ T	DC–10 kHz	Srednja snaga ,robusan , manji po veličini I jeftiniji
Optička vlakna	100 pT–100 $\mu$ T	DC–10 Hz	U izdradi
Halloov efekt	10 $\mu$ T–50 T	DC–1 MHz	Jako mala veličina i cijena. dobar za mjerenje jačih polja u malim prostorima
NMR	20 $\mu$ T –100 $\mu$ T 10 pT rezolucija	DC–5 Hz	Najveća točnost od svih. Primjena kao standard za kalibriranje

## **2. ZAHTJEVI MJERENJA**

### **2.1. Akceleratorski magneti**

Elektromagneti koji se koriste kao svjetlosno vođeni elementi u akceleratorima čestica ili prstenima za pohranu zahtijevaju jako malu toleranciju na njihovo magnetsko polje kao i njihovu geometrijsku poziciju u akceleratoru. Konstrukcijske tehnike, mjerna oprema i metode poravnanja moraju odgovarati tim zahtjevima. Dužina magneta je često mala u usporedbi s valnom duljinom oscilacije čestica u akceleratoru. To znači da su samo izmjereni integrali magnetskog polja i njegove derivacije oko svjetlosne osi od bitne važnosti.

Magnetska mjerenja su važna kroz različita stanja kod akceleratorskog projekta: dizajn, konstrukcija, instalacija i operacija. Magnetna svojstva mogu biti okarakterizirana kao jačina polja, kvaliteta i geometrija.

Jačina magnetskog polja ( ili krivulja uzbude ) uključuje krivulju histereze koja je od velikog značaja slabim magnetskim poljima. Kvaliteta polja, koja je distribucija polja u vremenu i prostoru, je bitna tijekom faze dizajniranja magneta i kasnije kod faze proučavanja svjetlosne optike. Geometrija polja dopušta mehaničkim referencama da definiraju i determiniraju dva kritična parametra: lokaciju svjetlosne osi i kut srednje ravnine.

Magnetni modeli su pravljani u vrijeme kada se akcelerator proučava i dizajnira. Na ovoj razini kvaliteta polja je najvažniji parametar i mogu se napraviti modifikacije kako bi dizajn magneta odgovarao zahtjevima. U toj se fazi moraju sve posebne značajke i procedure sastati s proizvodnim zahtjevima i biti razvijene.

Tijekom serijske proizvodnje magneta, jačina polja i geometrija moraju biti izmjerene kako bi bila nadgledana disperzija polja i potvrđena ili definirana pozicija mehaničke reference. Disperzija izmjerenih parametara je u interesu i jačine polja i kvalitete polja. Ta serijska mjerenja služe kao kontrola proizvodne kvalitete koja bi otkrila moguće nedostatke pri proizvodnji.

Mjerenja geometrije polja je od velike važnosti tijekom instalacije magneta i poravnanja u akcelerator. Problem povezan s poravnanjem je u lociranju magneta u akceleratoru prema izmjerenim karakteristikama disperzije. Na primjer, vrijednost jačine polja može odlučiti gdje

locirati ili kako kombinirati pojedine magnete. Ova procedura sortiranja može dovesti do smanjenja disperzije jačine savijanja, ali povećanja kvalitete (smanjenje troškova) akceleratora.

Svi izmjereni parametri magneta će i dalje biti od koristi tijekom puštanja u rad i upravljanjem akceleratora. Koristit će se za definiranje operacijske procedure kao kruženje magnetskog polja ili za utvrđivanje procedure ubrzanja čestica i dijagnostiku. To jest, ukupna vrijednost jačine savijanja instaliranog magneta može biti iskorištena za utvrđivanje apsolutne energije ubrzanje čestice.

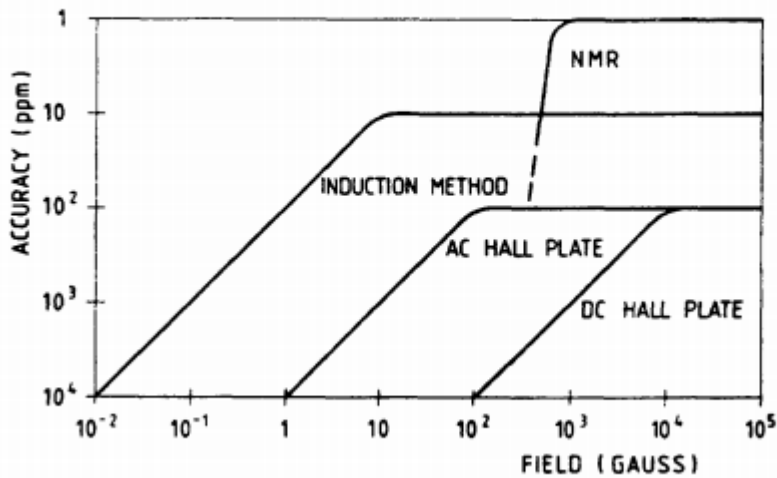
## **2.2. Detektorski magneti**

Granični uvjeti se malo razlikuju kod magnetskih mjerenja velikih detektorskih magneta. Zahtjevi za preciznost su manje strogi. U drugu ruku, vrijeme je često više ograničeno, posebno kada su magnetska mjerenja zakazana za kraj konstrukcijskog perioda ili još gore, kada je magnet već instaliran na akcelerator i mjerenja su jedino moguća tijekom perioda gašenja. Uz to, važno je da su mjerenja u potpunosti dovršena i certificirana prije instalacije detektora, vakumskih cijevi i ostalih komponenti. Ti zahtjevi traže detaljnu analizu zadatka, oprezan dizajn mjerne opreme i čistu ideju načina kako prezentirati rezultate sucu. Neki modeli su često dosta korisni i znaju sačuvati puno vremena.

## **2.3. Izbor metode mjerenja**

Izbor metode mjerenja ovisi o nekoliko faktora i za svjetlosno vođenje i za detektorske magnete. Jačina polja, homogenost i varijacija u vremenu, kao i zahtjevna točnost, sve mora biti uzeto u obzir. Kao vodič, slika 2.1 pokazuje točnost koja može biti dobivena u apsolutnom mjerenju kao funkcija razine polja za četiri najčešće korištene metode.





Slika 2.1 Mjerne metode: preciznost i raspon [4]

### 3. MJERNE METODE

#### 3.1. “Fluxmeter“ metoda

Ova metoda, bazirana na indukcijskom zakonu, je najstarija metoda za magnetska mjerenja koja se i danas koristi, ali može biti poprilično točna. Koristio ju je Wilhelm Weber sredinom prošlog stoljeća dok je proučavao varijacije u jačini i smjeru magnetskog polja Zemlje. Danas je ovo najvažnija metoda za magnete ubrzivača. To je još i najpreciznija metoda za mjerenje smjera magnetskih linija toka; to je posebna važnost za magnete ubrzivača. Mjerenja se izvode korištenjem fiksnih zavojnica u dinamičkom magnetnom polju ili pomicanjem zavojnica u statičnom polju. Gibanje zavojnice može biti rotacija oko određenog ugla, neprestana rotacija ili jednostavno gibanje od jedne pozicije do druge. Geometrija zavojnice često odgovara vrsti mjerenja. Jedan primjer je „Flux ball“ (kugla toka) čija je kompleksna konstrukcija omogućila precizno mjerenje nehomogenog polja.

Jako precizna mjerenja mogu biti ostvarena putem diferencijalnih „fluxmeter“ metoda gdje se koristi jedan par zavojnica spojenih opozicijski kod kojih se jedna zavojnica pomiče dok je druga fiksna. Kompenzacijom tih dviju zavojnica se dobiva veća osjetljivost prilikom ispitivanja kvalitete polja. Isti princip se koristi i kod metode mjerenja s harmonijskim zavojnicama kod koje se obje zavojnice pomiču. Koriste se razne konfiguracije, od

jednostavnih rotirajućih zavojnica do kompleksnih harmonijskih sustava zavojnice korištenih u poljima cilindrične simetrije.

### **3.1.1. Indukcijske zavojnice**

Metoda zavojnice je posebno prilagođena za mjerenja s dugim zavojnicama u svjetlosno vodičkim magnetima, gdje je preciznost mjerenja najveća briga [4]. Duge pravokutne zavojnice se često koriste u magnetima s širokim horizontalnim otvorima i određenim visinama praznina. Geometrija zavojnice je uzeta tako da odgovara određenim komponentama u polju. Induktivna zavojnica je inače rana na jezgri izrađena od mehanički stabilnog materijala, kako bi osiguralo konstantno područje zavojnice, i žice su oprezno zalijepljene na jezgru [5]. Staklo ili keramika s velikom temperaturnom konstantom se najčešće koriste kao materijal za jezgru. Prilikom namotavanja zavojnice žice moraju biti razvučene kako bi se dobro definirala geometrija i mehanička stabilnost zavojnice.

Neprestano rotirajuće zavojnice s komutacijskim polaritetom rade od 1880.godine. Metoda s harmonijskim zavojnicama je sada postala vrlo popularna kod magneta s kružnom cilindričnom geometrijom. Pomoć zavojnici je često rotirajući cilindar. Ova metoda je nastala 1954 [6].godine. Izazvani signal rotirajuće zavojnice je često prenošen kroz klizajuće prstene do frekvencijskog pojačala (analizator frekvencije), tako pružajući analognu harmonijsku analizu.

Uz dolazak modernih digitalnih integratora i kutnih enkodera, mjerenja s harmonijskom zavojnicom se puno poboljšala i sada se smatra najboljom metodom za većinu tipova ubrzivačkih magneta. Metoda pruža dodatne prednosti istodobnog mjerenja jačine, kvalitete i geometrije. Kompenzacijska zavojnica ,spojena u seriju i rotirana s glavnom zavojnicom koristi se zataškavanje komponente glavnog polja i tako pojača osjetljivost sustava za mjerenje kvalitete polja. Dinamička polja se mjere sa statičkom zavojnicom spojenom na određene harmonike.

Druga induksijska mjerenja se sastoje od pomicanja rastegnutih žica u magnetsko polje, tako integrirajući dio toka preko žice. Još je moguće mjeriti promjenu toka varirajući polje i držeći žicu u fiksnom položaju. Wolfram je čest odabir ako žica ne može biti u vertikalnom položaju. Preciznost je određena mehaničkom pozicioniranju žice. Osjetljivost je ograničena ali može biti poboljšanja korištenjem više-žičnih redova. Ova metoda je posebno prilagođena mjerenju geometrije, do apsolutne kalibracije 4-polnih polja i kod mjerenja jakim magnetima s malim otvorima

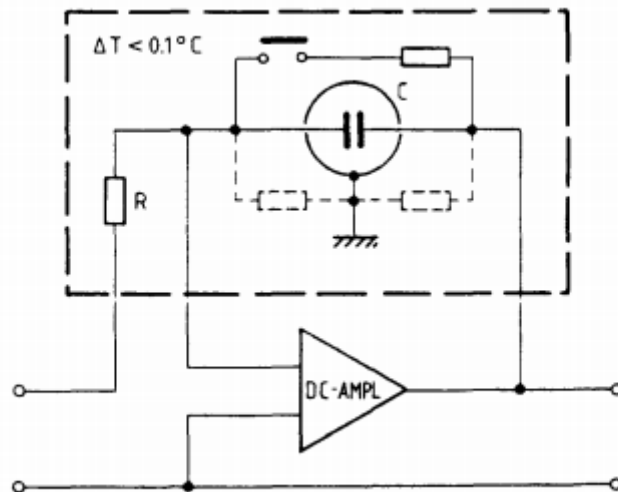
Izbor geometrije i metode ovisi o korisnosti otvora magneta. Osjetljivost „fluxmeter“ metode ovisi o površini zavojnice i kvalitete integratora. Integrator zavojnice može biti kalibriran na jako veliku preciznost. Ne samo da ekvivalent površine zavojnice mora biti izmjeren, nego i središnja ravnina koja se često razlikuje od svoje geometrijske sredine zbog grešaka pri namotavanju. U slučaju dugih zavojnica za mjerenje, bitno je osigurati vrlo usku toleranciju na širinu zavojnice. Ako polje varira više nego sto je dužina zavojnice, možda je potrebno preispitati varijaciju efektivne dužine. Hibridni permanentni dipolni magnet je razvijen za tu svrhu u Luru. Ima magnetsku dužinu od 60mm i korisnu širinu od 30mm.

Glavna prednost tehnike induktivne zavojnice je mogućnost vrlo fleksibilnog dizajna zavojnice. Velika stabilnost efektivne površine zavojnice je isto prednost. Linearnost i široki dinamički raspon isto igra bitnu ulogu. Tehnika može lako biti adaptirana za mjerenje pri niskim temperaturama. Nakon kalibriranja zavojnice na temperaturi tekućeg dušika, samo manje preinake moraju biti odrađene za uporabu pri nižim temperaturama. U drugu ruku, mjerenja u statičnom polju su dosta spora.

### **3.1.2. Mjerenje toka**

Indukcijske zavojnice su se originalno koristile s balističnim galvanometrima a kasnije s razrađenim „fluxmetrima“ [7]. Metoda zavojnice se puno poboljšala s razvitkom fotoelektričnih „fluxmetara“ koji su korišteni dug period vremena. Preciznost mjerenja je isto poboljšana s upoznavanjem klasičnog elektroničkog integratora, Miller-ov integrator. Kasnije, dolazak digitalnih voltmetra je učinio brza apsolutna mjerenja mogućim i time je Miller-ov integrator postao najpopularniji „fluxmetar“. Zbog razvitka istosmjernog pretvarača čvrstog stanja, integrator postaje jeftiniji i često se koristi u sustava s više zavojnica.

Slika 3.1 prikazuje primjer takvog integratora. On je baziran na istosmjernom pojačalu s jako malim naponom na ulazu i velikim pojačanjem u otvorenoj petlji [8]. Termalna varijacija integriranog kondenzatora je najveći problem. Integrirajuće komponente su prije svega ugrađene u temperaturno kontrolirani prostor. Drugi problem je raspad izlaznog signala kroz kondenzator i poništavajući relej. Pažljiva zaštita tih komponenti je potrebna kako bi se smanjio napon na kritičnim površinama otpora.

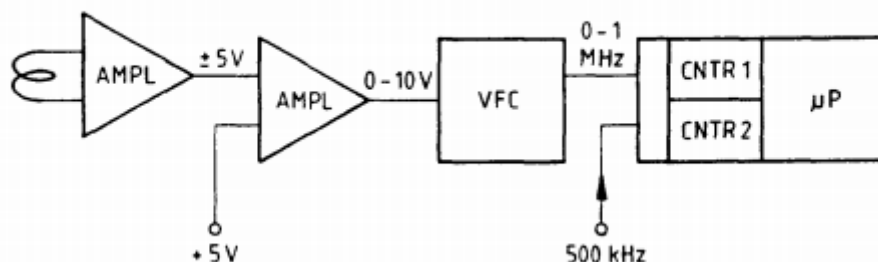


Slika 3.1 Analogni integrator [8]

Dielektrična apsorpcija integriranog kondenzatora određuje granicu preciznosti integratora . odgovarajući integrirani otpornik je lakše naći. Većina metal-film otpornika ima sličnu karakterističnu stabilnost i temperaturu kao i kondenzator. Osjetljivost integratora je određeno istosmjernom strujom i malom frekvencijom ulaza pojačivača. Prosječna vrijednost je  $0.5 \mu\text{V}$  koja mora biti pomnožena s vremenom mjerenja kako bi se izrazila osjetljivost toka. Toplinski izazvan napon može stvarati probleme pa se zbog toga moraju pažljivo birati kabeli i konektori. Pri testu u CERN-u sveukupna stabilnost vremenske konstante integratora se pokazala bolja za 50 ppm tijekom perioda od tri mjeseca. Par elektroničkih integratora je industrijski razvijeno i pušteni su u komercijalnu prodaju.

U zadnjih nekoliko godina je razvijen novi tip digitalnog integratora koji je baziran na visoko kvalitetnom istosmjernom pojačivaču spojenim na naponsko-frekvencijski pretvarač (VFC) i brojač. Verzija prikazana u slici 4. je razvijena u CERN-u i danas je komercijalnu dostupna. Ulaz na VFC-u je 5V kako bi se dobilo pravo bipolarno mjerenje. Ulaz je dobiven iz 500 kHz signala koji je podijeljen s izlazom VFC-a. Dva brojača se koriste za mjerenje pomičnih zavojnica i za očitavanje integratora. Jedan od brojača se može pročitati i resetirati dok je drugi i dalje aktivan. Na ovaj način se neće nakupiti greške. Ovaj integrator ima linearnost 50 ppm. Njegova osjetljivost je ograničena ulazom pojačivača, u ovom slučaju analognog pojačivača.

Ovaj sustav je poprilično dobro adaptiran digitalnom vođenju ali se nameće limit promjene toka jer ulazni signal nikad ne smije preći naponsku razinu VFC-a. Period integratora mora biti jedna sekunda kako bi se održalo razumno rješenje.



Slika 3.2 Digitalni integrator [8]

### 3.2. Metoda Hall-ovog generatora (Hall-ov efekt)

1879. godine E.H. Hall je otkrio da metalna traka kojom teče struja i na koju djeluje okomito magnetsko polje stvara transversalno električno polje i poprečni električni napon. Prvo magnetsko mjerenje je izvedeno korištenjem ovog efekta 1910. godine. Unatoč tome, tek oko 1950. godine su razvijeni poluvodički materijali s kojima se moglo mjeriti i od tada je ova metoda puno korištena. To je jednostavna i brza metoda mjerenja s relativno dobrom preciznošću i zbog toga se najčešće koristi kod mapiranja polja velikih razmjera.

#### 3.2.1 Mjerenje Hall-ovim sondama

Hall-ov generator pruža trenutna mjerenja, koristi jednostavnu električnu opremu za mjerenje i nudi kompaktne sonde, odgovarajuće za točna mjerenja. Sonde mogu biti montirane na relativno lakoj pozicijskog opremi [9]. Znatno vrijeme mjerenja može biti dodano montiranjem Hall-ovih generatora u modularne nizove s više sonde i primjenom višestrukog mjerenja napona. Široko dinamično područje i mogućnost statičkih operacija su još jedna zanimljiva prednost. Širok izbor ovog tipa gaussmetra je komercijalno dostupno.

Međutim, nekoliko čimbenika određuje granicu održive preciznosti. Najznačajniji je temperaturni koeficijent Hall-ovog napona [10]. Temperaturna stabilizacija se koristi kako bi se prešlo preko ovog problema, ali se povećava veličina sklopa sonde. Temperaturni koeficijent se isto može uzeti u računicu za kalibriranje sonde kako bi se nadgledala temperatura tijekom mjerenja. Još ovisi o razini magnetskog polja za koji su potrebne relativno kompleksne tablice za kalibriranje (umjeravanje). Još jedna komplikacija planarnog Hall-ovog efekta je da slabo magnetno polje ispada u normalu jer je jako magnetsko polje prisutno u paraleli s ovom ravninom. Ovaj efekt određuje granice polja koji nema definiranu geometriju i zbog toga se

koristi u odlučivanju geometrije polja. Mnoga moguća rješenja postoje ali su teška za primijenit.

Zadnje ali ne manje važno je problem nelinearnosti kalibracijske krivulje, pošto je Hall-ov koeficijent funkcija razine polja. Hall-ov generator križnog tipa pokazuje bolju linearnost i ima manju aktivnu površinu nego uobičajen pravokutni generator [11]. Njegov magnetni centar je bolje definiran i zbog toga bolje odgovara mjerenjima u jakim nehomogenim poljima. Specijalni tipovi, koji imaju manju temperaturnu ovisnost, su dostupni u trgovinama ali oni pokazuju manju osjetljivost.

Mjerenje Hall-ovog napona stavlja limit na oko 20  $\mu\text{T}$  na osjetljivost mjerenja, ako je konvencionalna uzbuđenost istosmjerne struje primijenjena na sondu. To je prouzročeno zbog temperaturnih napona u kabelima i konektorima. Osjetljivost može biti znatno poboljšana primjenom izmjenične uzbude. Dobra preciznost u slabim poljima može biti ostvarena primjenom sinkroniziranih detekcijskih tehnika za mjerenje Hall-ovog napona [12].

Specijalni Hall-ovi generatori za niske temperature su također komercijalno dostupni. Iako pokazuju jako mali temperaturni koeficijent, nažalost otkrivaju dodatne probleme pri niskim temperaturama. Tako zvani „ de Haas-Schubnikov efekt“ [13] prikazuje oscilatorni efekt ovisnosti Hall-ovog koeficijenta o polju koji je oko 1 posto u jačim poljima, ovisno o tipu poluvodiča koji se koristi u Hall-ovom generatoru [14]. To dodaje ozbiljne komplikacije kalibraciji. Problem se može riješiti lociranje Hall-ovog generatora u zagrijanom anti-kriostatu. Komplikacije povezane s planarnim Hall-ovim efektom su manje bitne pri nižim temperaturama.

### **3.2.3. Kalibriranje (umjeravanje)**

Hall-ovi generatori su često kalibrirani u magnet u kojem je polje izmjereno istovremeno korištenjem tehnike nuklearne magnetske rezonance. Kalibracijska krivulja je najčešće prikazana u formi polinoma velikog reda (9 ili više) pristajući dovoljno velikom kalibracijskom broju. Ovaj prikaz ima prednost jednostavnog računanja magnetske indukcije iz relativno malih tablica koeficijenata.

Fizički bolji prikaz je korištenje kubne interpolacije po dijelovima kroz dovoljan broj kalibracijskih bodova koji su izmjereni s velikom preciznošću. To može biti izvedeno preko jednostavne Lagrange-ove interpolacije ili još bolje preko funkcije za kubno savitljivu šipku. Prednost ove funkcije je minimalna zakrivljenost i najbolja aproksimacija. Funkcija se lako

prilagođava sama prema ne analitičkim funkcijama i jako dobro pristaje interpolacijama iz tablica eksperimentalnih podataka. Funkcija je definirana kao polinom trećeg stupnja koji prolazi kroz kalibracijske bodove tako da je derivacija funkcije stalna kod ovih bodova. Računanje koeficijenta polinoma može oduzeti dosta vremena ali je potrebno samo jednom tijekom kalibracije. Koeficijenti (normalno oko 60 za bipolarnu kalibraciju križnog Hall generatora) se mogu lako pohraniti u mikroprocesor i sljedeće računanje polja ide jako brzo. Kvaliteta kalibracijske funkcije može biti ovjerena iz mjerenja vrijednosti polja između kalibracijskih bodova. Dobro dizajnirana Hall-ova sonda može biti kalibrirana na dugoročnu preciznost od 100 ppm. Održavajući Hall-ov generator stalno u pogonu, preciznost bolja od 30ppm može biti održana u periodu od nekoliko mjeseci.

### **3.3. Tehnika magnetske rezonance**

Tehnika magnetske rezonance je često korištena, ne samo za kalibriranje, nego i za jako precizno mapiranje polja. Ova metoda mjerenja je prvi put korištena 1938. godine za mjerenje nuklearnog magnetnog momenta u molekularnim zrakama. Nekoliko godina kasnije ovaj fenomen je proučavan u krutim tvarima od dva neovisna istraživačka tima. Od tada, ova metoda je postala najvažnija metoda za mjerenje magnetskog polja s jako velikom preciznošću. Sada se smatra glavnim standardom za kalibriranje. Bazirana na lakom i preciznom mjerenju još je i neovisna o temperaturnim varijacijama. Komercijalno dostupni instrumenti mjere polje u granicama od 0.045 T sve do 13 T s preciznošću boljom od 10 ppm.

Prednost metode je njena velika preciznost, njena linearnost i statičke operacije sustava. Najvažnija slabost je potreba za homogenim poljem kako bi se održao dovoljan koherentni signal. Mala kompenzacijska zavojnica koja pruža gradijent polja, je često stavljena oko sonde kad se koristi u neznatno nehomogenom polju. Korekcije od oko 0.2T su možda dobivene. Limitirana osjetljivost i dinamički raspon također stavljaju granice korištenja ove metode. Na kraju, treba reći da sonde za niske temperature nisu još komercijalno dostupni.

Magnetska rezonanca s prikazom (MRI-eng. *magnetic resonance imaging*) je predložena za mjerenja s akceleratorским magnetima. To je vrlo obećavajuća tehnika koja je pokazala svoju kvalitetu pri drugim korištenjima. Međutim, obrada signala zahtijeva moćne računalne sustave, koji nisu bili toliko dostupni u prošlosti.

### **3.4. „Fluxgate“ magnetometar**

Fluxgate magnetometar je baziran na feromagnetskoj jezgri i predstavljen je 1930-tih godina. Jezgra je napravljena od finih žica Mumetala ili sličnih materijala koji imaju skoro pravokutnu

krivulju histereze. U svojim prvim oblicima sadržavala je 3 namota: zavojnicu uzbuđenu izmjeničnom strujom, zavojnicu za detekciju i istosmjernu prednaponsku zavojnicu koja stvara i održava polje nule. Metoda je ograničena samo za slaba polja ali ima prednost pružanja linearnih mjerenja i dobro odgovara statičkim operacijama. Zbog njene fine vremenske razlučivosti dobra je kod primjene u vremenu. Puno kompleksnije konfiguracije zavojnica se koriste za preciznija mjerenja i u slučajevima u kojima mjerena polja ne smiju biti iskrivljena zbog sonde. Najinteresantnije korištenje je u istraživanju svemira i bitan razvitak ove tehnologije je bio u prošlom desetljeću. Korištenje modernih materijala za magnetne jezgre je povećalo osjetljivost na 20 pT i može osigurati širok dinamički raspon. Gornja granica mjernog raspona je često oko nekoliko desetaka mili tesla, ali se može proširiti hlađenjem vodom prednaponske zavojnice. Fluxgate magnetometri s normalnim rasponom od 1 mT i rezolucijom od 1 nT su komercijalno dostupni iz nekoliko izvora. Oni imaju još puno drugih praktičnih koristi, na primjer u navigacijske svrhe.

### **3.5. Magnetootpornički efekt**

Magnetootpornost bizmuta je eksploatirana vrlo rano i komercijalni instrumenti su već postojali krajem prošlog stoljeća. Tehnički problemi su, međutim, važna ovisnost o temperaturi i mehaničkoj napetosti, kombinirani s poteškoćama izrade i problema s električkim vezama, stvorili nedostatak pouzdanosti kod ove mjerne metode. Kao kod Hall-ovog generatora, metoda je postala uspješna kada su poluvodički materijali postali dostupni. Tada su jeftini magnetootpornici došli u trgovine i također su se koristili za magnetska mjerenja.

### **3.6. Mapiranje vizualnog polja**

Najpoznatija metoda mapiranja vizualnog polja je prostiranje željeza u prahu na horizontalnoj površini postavljenoj u blizini magnetskog izvora, tako prikazujući jednostavnu sliku raspodjele linija toka. Još jedna klasična metoda je postaviti magnetsku iglu u prostor gdje se može gibati i očitati pravac vrha igle. Ova metoda je korištena puno prije otkrića elektromagnetizma za proučavanje zemljinog magnetskog polja.

#### **3.6.1. Faraday-ev efekt**

Magnetsko-optička rotacija polarizirane svjetlosti kroz sredstvo s usporednim smjerom na magnetsko polje (Faraday-ev efekt) je klasična metoda za vizualizaciju magnetskih polja. Rotacija ravnine je proporcionalna jačini polja i dužini polariziranog medija. To može dati određenu indikaciju geometrije polja. Ovaj princip mjerenja se utvrdio korisnim za privremena



magnetska polja [15]. Manje je uvjerljivo za precizno određivanje magnetske geometrije, iako moderne tehnike procesiranja možda poboljšaju ovu metodu.

### **3.6.2 Metoda plutajuće žice**

Mjerenja plutajuće žice su bila dosta popularna u prošlosti. Ako je konduktor rastegnut u magnetskom polju, on će zakrenuti elektromagnetskom silom i opisati put nabijene čestice s odgovarajućim momentom struje i mehaničke napetosti žice. Fleksibilna, žarena, aluminijska žica se koristila kako bi se smanjio efekt krutosti i gravitacije. Ova metoda je sada kompletno zamijenjena s preciznim mapiranjem polja i kompjuterskom simulacijom putanja čestica.

## **4. DEFINICIJA GEOMETRIJE POLJA**

Jedan od glavnih razloga sinkronizacije magnetskog mjerenja svjetlosno-vođenih magneta je pozicioniranje i verifikacija mehaničkih referentnih meta za korištenje pri instaliranju i ravnanju magneta. Potrebna je jako mala tolerancija, posebno za ravnanje 4-polnih.

### **4.1. 2-polna geometrija**

Kritičan parametar za ravnanje 2-polnih je srednja ravnina. Glavno pravilo je da preciznost bude 0.1 mrad. Mehanička referentna površina ili mete poravnanja su postavljene na poziciju, koje su lako dostupne tijekom instalacije, poravnanja i, ako je potrebno, za naknadna periodička istraživanja. U klasičnim magnetima s željeznom jezgrom, kut srednje ravnine je često definiran nakon preciznog mehaničkog mjerenja geometrije praznine i njene varijacije duž puta čestice. Međutim, ovaj kut ovisi i o jačini polja, stoga je nužno odraditi i magnetska mjerenja. Nagib srednje ravnine može biti prouzročen elastičnom deformacijom jarma zbog magnetskih sila, ili zbog magnetskog zasićenja asimetrične željezne jezgre ili zbog utjecaja obližnjih feromagnetskih struktura. Kod supervodljivih magneta, gdje geometrija polja ovisi o poziciji vodiča, nagib ravnine se uvijek mora izmjeriti magnetskim senzorom.

Mehanička mjerenja su vrlo jednostavna za izvest korištenjem komercijalno dostupnih inklinometara. Precizna magnetska mjerenja su najbolje dobivena metodom „fluxmetrom“. Najjednostavnija solucija je montiranje fiksne indukcijske zavojnice s velikom površinom magneta okomitom na srednju ravninu i opremljenu s inklinometrom za određivanje kuta. Mijenjajući magnetsko polje između dvije poznate razine i mjerenje odgovarajuće varijacije toka, možemo izračunati kut. Ovaj kut uključuje geometrijsku grešku indukcijske zavojnice, koju možemo kompenzirati ( i izmjeriti ) rotiranjem zavojnice za 180 stupnjeva i ponovnim mjerenjem. Preciznost oko 0.02 mrad se održava i određena je samo mehaničkoj podršci

zavojnice. Set razvučenih žica može zamijeniti zavojnicu, ili jedna razvučena žica može biti pomaknuta u okomitu ravninu na srednju ravninu u jako statičko polje. Zavojnice s klatnom su isto uspješne u statičkom polju i imaju prednost pružajući direktne reference gravitacije. Dobar harmonijski sustav zavojnica uključuje pogodnost preciznog mjerenja srednje ravnine. Ispravci geometrijske greške zavojnica se dobivaju zakretanjem mjernog cilindra za 180 stupnjeva oko svoje vertikalne osi.

Kompas magnetometri mogu dati indikaciju smjera linija toka u magnetu, ali za preciznija mjerenja ova metoda ima dva nedostatka. Kao prvo, mehanička sila na igli kompasa je 0 u ravnotežnim uvjetima i kao drugo, prisutnost magnetometra može poremetiti polje u jarmu magneta. Jednako, Hall-ov generator nije idealan za ovo mjerenje zbog planarnog Hall-ovog efekta koji daje polju geometrijsku grešku. Za ispravke grešaka senzora mjerenja kompasom i Hall-ovim generatorom je nužno zakretanje mjerne sonde za 180 stupnjeva kao u ostalim slučajevima.

## **4.2. Višepolna geometrija**

Za višepolne magnete, pozicioniranje magnetske osi je važnije nego kut srednje ravnine. Tipični zahtjev 4-polnog je da pozicija njegove osi mora biti poznata i reprezentirana na preciznost 0.1 milimetar ili bolju. Kod klasičnih željeznih magneta, kao kod mjerenja srednje ravnine 2-polnih, mjerenja su bazirana na preciznim mehaničkim mjerenjima geometrije jarma i njegove varijacije duž magneta. Metoda harmonijskih zavojnica pruža jako precizna mjerenja magnetske geometrije, čak i promatranje fenomena ovisnosti polja može biti odrađeno s velikom preciznošću. Magnetska os može biti promatrana s preciznošću od par mikrometara, ali problem s transferom referentnih meta ostaje, zbog toga je teško dobiti završnu preciznost. Metoda razvučene žice se također pokazala sasvim prikladnom za ovo mjerenje.

Zapažanja optičkih efekata se koristi za odlučivanje o geometriji višepolnih magneta. Oni prikazuju spektakularnu ilustraciju distribucije polja. Faraday-ev efekt i prijenos svjetla kroz koloidnu suspenziju diamagnetskih čestica su se koristili u prošlosti. Dobivene preciznosti su, međutim, dosta lošije nego ove dobivene mjerenjem harmonijskih zavojnica. Možda će razvoj preciznih kamera i opreme za procesiranje slika pomoći ovoj situaciji.

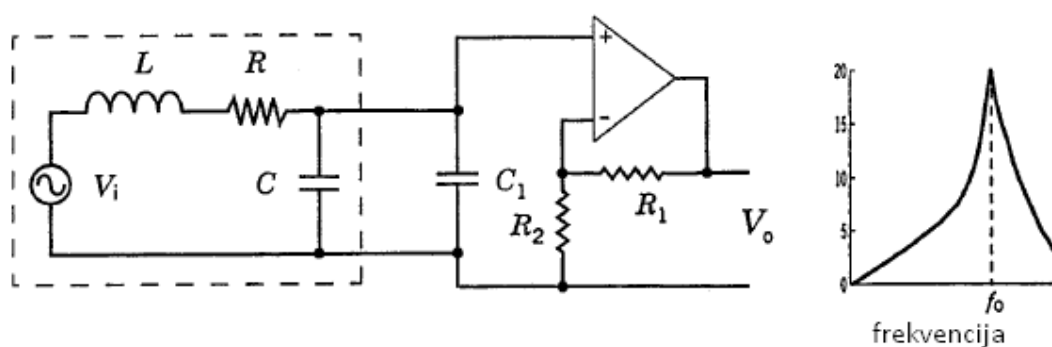
Korištenje laserskih zraka i fotoelektričnih dioda za detektiranje pozicije su sada zamijenila klasične metode poravnanja baziranim na teleskopima i optičkim metama. To poprilično poboljšava preciznost i brzinu mjerenja, kada su referentne mete postavljene na svoje mjesto.

## 5. MAGNETSKI SENZORI I SIGNALI

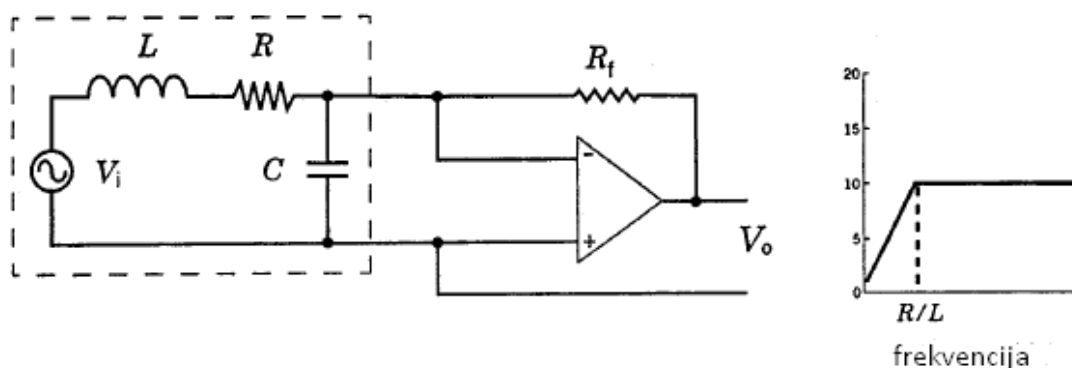
### 5.1 Općenito o magnetskim sensorima i signalima

Magnetski senzori se razlikuju od većine drugih detektora po tome što ne mjere direktno fizičku vrijednost od interesa. Konvencionalni senzori detektiraju fizikalnu vrijednost direktno dok magnetski senzori detektiraju promjene u magnetskom polju i iz njih dobivaju informacije o fizikalnoj vrijednosti. Naročitost magnetskih senzora: mjerenje bez kontakta je zgodno za teško okruženje. Integrirani magnetski senzori: senzori koji koriste standardan CMOS proces, baziran na mjerenju Lorentz-ovom silom su Hall-ovi senzori, a senzori koji koriste jedan od nekoliko dodatnih feromagnetskih slojeva, baziranim na mjerenju magnetske otpornosti su: AMR, GMR, TMR, senzori induksijske zavojnice i „Fluxgate“.

Kako bi bio koristan, signal induksijske zavojnice mora biti uslovan koristeći ili naponsko ili strujno pojačalo. Slika 5.1. prikazuje konfiguraciju kruga za obje signalne metode.



5.1.1. Konfiguracija kruga s naponskim pojačalom



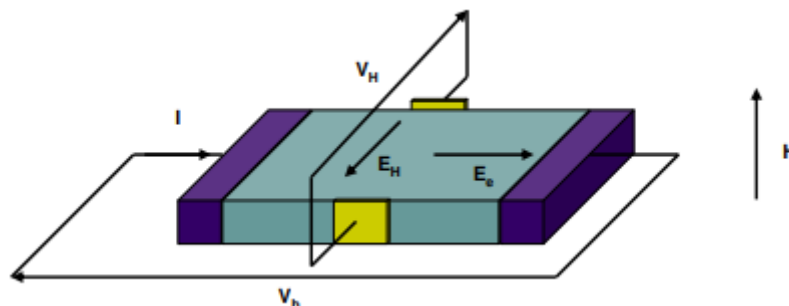
5.1.2. Konfiguracija kruga s strujnim pojačalom

Naponski pojačivač može imati jedno-krajni ili diferencijalni ulaz i može biti podešen ili ne podešen. Izlazni signal naponskog pojačivača je proporcionalan veličini i frekvenciji polja za frekvencije puno niže rezonance. Njegov izlaz će dostići vrhunac pri rezonantnoj frekvenciji zavojnice ili pri podešenoj frekvenciji. Zato što njegov izlazni signal ovisi i o frekvenciji i o jačini magnetskog polja, naponski pojačivač više odgovara užem pojasu ili aplikacijama s podešenim frekvencijama.

U konfiguracijama sa strujnim pojačivačem, terminali induksijske zavojnice su spojeni s virtualnim tлом. Sve dok je produkt pojačanja pojačala i otpornosti zavojnice puno veći nego povratni otpornik, veličina izlaznog signala je neovisna o frekvenciji ispod  $R/L$  ( $\text{rad s}^{-1}$ ) kuta zavojnice. To ostaje tako do rezonantne frekvencije zavojnice. Zbog ovog razloga, konfiguracija strujnog pojačivača je naročito odgovarajuća za širokopoljasna mjerenja jačine magnetskog polja. Strujni pojačivač minimizira intermodulacijsko iskrivljenje u induksijskim zavojnicama s magnetskom jezgrom. Struja koja teče zavojnicom stvara magnetsko polje koje se suprotstavlja okolnom polju. To zadržava mrežu polja u jezgri oko nule. Magnetometri na bazi zavojnice s pojačivačem struje su izrađeni s ravnim frekvencijskim odzivom od 10 [Hz] do više od 200 [kHz]. Neki magnetometri dizajnirani za geo-fizička istraživanja imaju kutove niske frekvencije koji se protežu do 0.1 [Hz].

## 5.2. Hall-ov senzor

Obično, Hall-ov senzor je tanka ploča vodljivog materijala s četiri električna kontakta na svojoj periferiji. Prednaponska struja je isporučena na uređaj preko dva kontakta, koji se zovu strujni kontakti. Druga dva kontakta su postavljena na dva ekvipotencijalna mjesta na granicama ploče. Ovi kontakti se zovu naponski ili dodirni kontakti. Prednaponski napon  $[V_b]$  je ispučen na ploču preko dva naponska kontakta. Taj napon stvara električno polje  $[E_e]$  i struju  $[I]$ . Ako je okomito magnetsko polje  $[H]$  primijenjeno na uređaj, napon se pojavljuje između dodirnih kontakata. Taj napon  $[V_H]$  se zove Hall-ov napon.



5.2. Shema Hall-ovog senzora[16]

Prednosti Hall-ovog senzora su: najkorišteniji magnetski senzori, puno mogućnosti mjerenja (mjerenje struje, kuta, radijalnog položaja, aksijalnog položaja), jeftini. Nedostatci: ofset, buka, mala osjetljivost, velika potrošnja. Minijaturizacija Hall-ovih senzora pogoršava njihov rad. Pogoršanje rada može biti kompenzirano povezanim električkim krugom, ali to povećava troškove proizvodnje. Hall-ov napon se manifestira djelom Lorentz-ovih sila[1-1]:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v} \times \vec{B}] \quad (1-1)$$

[q] označuje naboj čestica, [E] je električno polje koje stvara struja, [v] je nositelj brzine i [B] je magnetska indukcija.

Brzina nosača [1-2]:

$$\vec{v} = \mu\vec{E} = \frac{\vec{E}}{\rho nq} \quad (2-2)$$

[ $\mu_p$ ] označuje mobilnost nosača, [ $\rho$ ] otpor materijala, [n] gustoću (broj nosača po jedinici volumena). Brzina nosača je proporcionalna njihovoj mobilnosti i obrnuto proporcionalna gustoći nosača i debljini ploče. Stoga, jačina Hall-ovog efekta je proporcionalna mobilnosti nosača i obrnuto proporcionalna produktu debljine ploče i koncentracije nosača. Zbog toga, moderne Hall-ove ploče za magnetske senzore su često realizirani u formi slabo-omamljenih poluvodičkih tankih slojeva.

Hall-ov napon [1-3]:

$$V_H = \frac{R_H}{t} IB_Z = \frac{1}{nqt} IB_Z \quad (3-3)$$

$R_H = 1/(nq)$  je Hall-ova konstanta,  $[t]$  je debljina ploče,  $[I]$  je struja, i  $[B_z]$  je projekcija magnetskog polja na z osi.

Osjetljivost: odziv izlaznog napona Hall-ovog uređaja na magnetsko polje može biti okarakterizirano na 3 načina:

- Apsolutna osjetljivost :

$$S_A = \left| \frac{V_H}{B_z} \right|$$

- Osjetljivost povezana s opskrbom struje:

$$S_I: S_I = \frac{S_A}{I} = \left| \frac{1 V_H}{I B_z} \right|$$

- Osjetljivost povezana s opskrbom napona:

$$S_V = \frac{S_A}{V} = \left| \frac{1 V_H}{V B_z} \right|$$

Ofset napona  $[V_{off}]$  Hall-ovog uređaja je kvazi-statički izlazni napon koji postoji u odsutnosti magnetskog polja. Ofset napona dopijeva na električnu nesimetriju (izazvanom malim greškama u geometriji, varijacije u gustoći dopinga , otpornost dodira...). Ofset Hall-ovog uređaja je najbolje prikazana ofsetom ekvivalentnim magnetske indukcije  $[B_{off}]$  [1-4]:

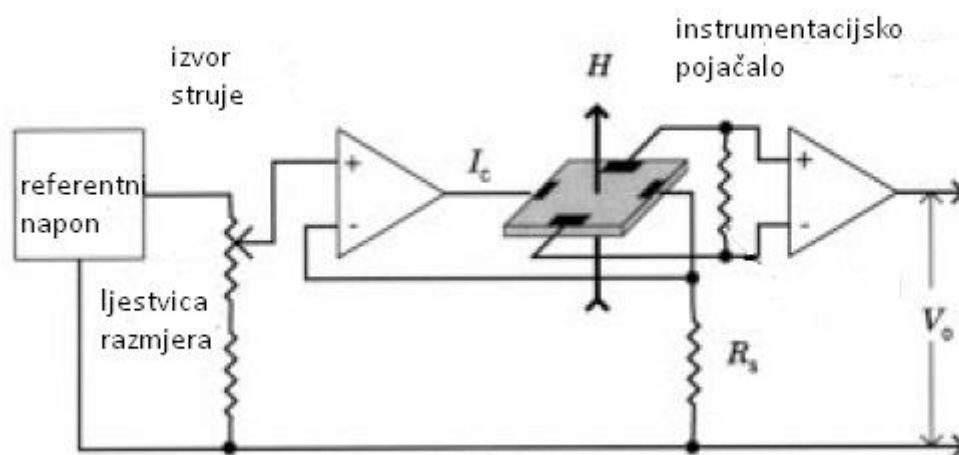
$$B_{off} = \frac{1 V_{off}}{S_v V} \propto \frac{1 V_{off}}{\mu_p V} \quad (4-4)$$

Ofset strogo ograničava primjenjivost Hall-ovih uređaja kada ne periodički ili nisko frekventni magnetski signali moraju biti detektirani. Od prošlih rezultata, važno je zabilježiti važnost materijala visoke mobilnosti za Hall-ove uređaje kako bi dostigli visoku osjetljivost i mali ofset.

Jednostavni Hall efektivni gaussmetar može biti konstruiran korištenjem kruga signala prikazan u slici 5.3.. Referentni napon, operacijski pojačivač i osjetni otpornik  $[R_s]$ , stvaraju konstantni izvor struje čija se struja zove kontrolna struja  $[I_c]$ . Za najbolje performanse, referentni napon i  $[R_s]$  bi trebali biti vrlo stabilni s temperaturom i

vremenom. Operacijski pojačivač opće namjene može biti korišten za slabe kontrolne struje. Pojačalo je potrebno za kontrolne struje iznad 20 [mA].

Hall-ov napon može biti uslovan i pojačan od strane bilo koje jake impedancije ( $> 1k \Omega$ ) diferencijalnog pojačivača. Precizni instrumentacijski pojačivač je dobar izbor jer ima adekvatnu ulaznu impedanciju, njegovo pojačanje može biti određeno stabilnim otpornikom i s otpornikom koji poništava nula ofset na uređaju s Hall-ovim efektom. Neki uređaji zahtijevaju teretni otpornik preko terminala s Hall-ovim naponom kako bi se dobila optimalna linearnost.



5.3. Primjer konstrukcije gaussmetra s Hall-ovim efektom [16]

### 5.3. Magneto otpornički senzori

Magneto otpornici su drugi najkorišteniji magnetski senzori. Rade na principu da im se otpornost mjenja u prisustnosti magnetskog polja. Omjer magneto otpornosti (MR) [1-5]:

$$MR(\%) = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{min}} \times 100 \quad (5-5)$$

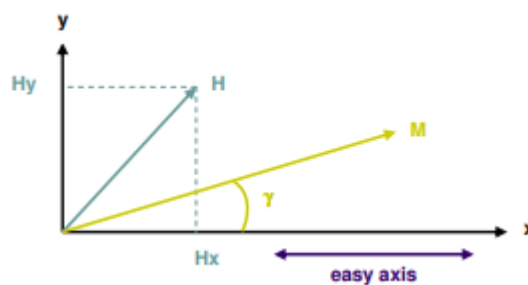
Različite vrste magneto otpornika:

- Anizotropni magneto otpornik (AMR)
- Gigantski magneto otpornik (GMR)
- Tunelski magneto otpornik (TMR)

**1. Anizotropni magnetootpornici (AMR)** su bazirani na feromagnetskim metalima ili legurama koje izlažu anizotropnu otpornost u magnetskom polju. Anizotropna otpornost je razlika između otpornosti mjerene kada je struja paralelna na vektor magnetskog momenta i na otpornost mjerenu sa strujom okomitom na magnetski moment. Otpornost zavisi o relativnom kutu  $[\varphi]$  između struje i magnetskog momenta [1-6]:

$$\rho(\phi) = \rho_{\rightarrow} + (\rho_{\leftarrow} - \rho_{\rightarrow})\cos^2\phi \quad (6-6)$$

U feromagnetskom tankom sloju, ukupni vektor magnetskog momenta  $[M]$  je poravnat uz os najniže energije, zvanom laka os (easy axis). Pod utjecajem vanjskog magnetskog polja  $[H]$ , magnetski moment  $[M]$  rotira pod kutem  $[\gamma]$ .



#### 5.4. Graf vektora magnetskog momenta

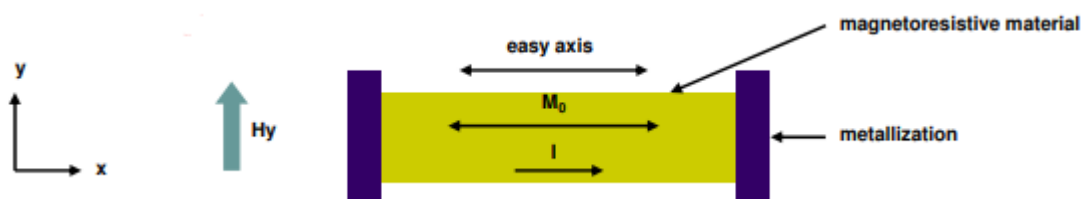
Prema teoriji Stoner-Wohlfarth, kut  $[\gamma]$  između lake osi i momenta  $[M]$  se može opisati kao[1-7]:

$$\sin(\gamma) = \frac{H_y}{H_\delta + \frac{H_x}{\cos(\gamma)}} \quad (7-7)$$

( $H_s$  = polje zasićenja)

Magnetootpornički senzori bazirani na feromagnetskim materijalima

- Osnovna struktura





### 5.5. Shema strukture magnetootporničkog senzora

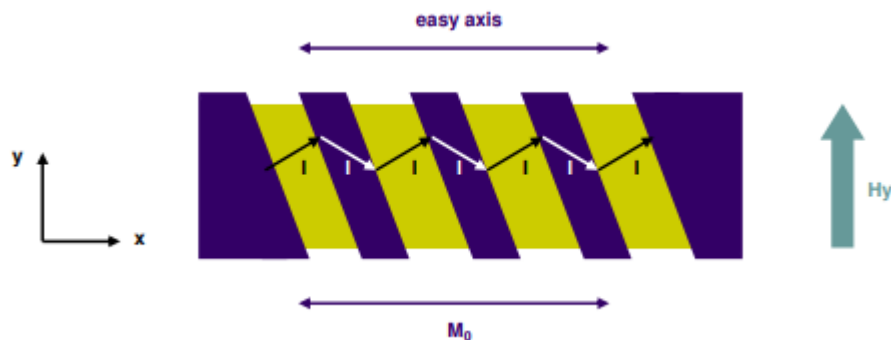
- Rezultirajući otpor[1-8]:

$$R(H) = R_0 - \Delta R \left( \frac{H_y}{H_\delta} \right)^2 \quad (8-8)$$

- Nedostatci: kvadratno ponašanje, osjetljivost nestaje za slaba vanjska polja.

Rješenje za linearizaciju osjetljivosti je rotiranje smjera struje u odnosu na laku os. Postoje dvije mogućnosti :

- **Rotiranje  $M_0$** : primjenom, tijekom razrađivanja feromagnetskog materijala, magnetsko polje u dobro definiran smjer. To bi rezultiralo rotacijom lake osi. Kut od 45 stupnjeva se često koristi.
- **Brijački stupovi**: u ovoj konfiguraciji[17], trake dobro vodljivog materijala su smještene između traka magnetootpornog materijala s manjom vodljivošću.

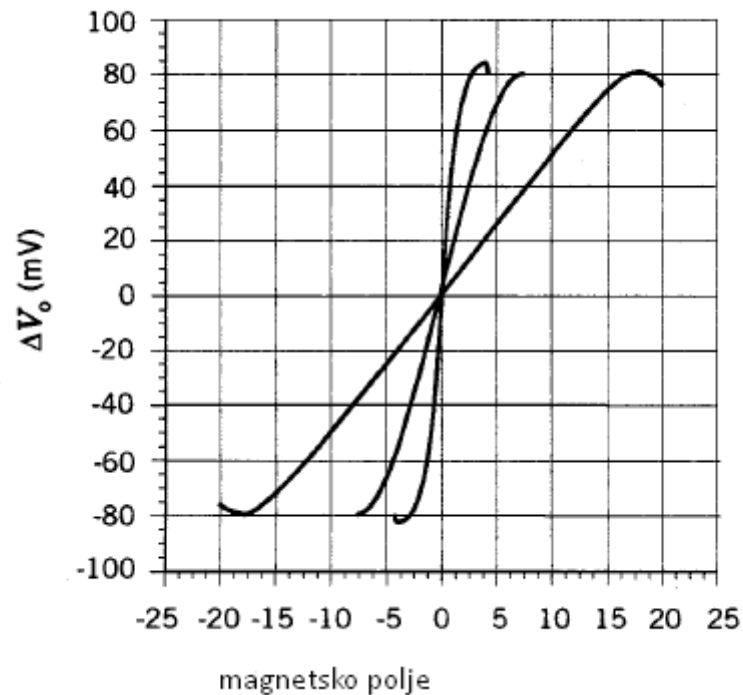


### 5.6. Shema strukture „brijačkog stupa“[17]

Struja će onda pratiti put s najnižom otpornosti između dvoje kontaktne elektrode. Pokušati će minimizirati put u magnetootpornom materijalu gdje je otpornost veća.

Konvencionalan Wheatstone mostni signalni krug može biti korišten za procesiranje AMR mosta. Osjetljivost mosta i nula ofset su proporcionalni naponu mosta, stoga je bitno koristiti dobro reguliranu opskrbu s malo buke i dobrom temperaturnom stabilnosti.

Polarnitet transfer funkcije je određena polarnostima ( $H_k + H_b$ ). Ako je senzor izložen vanjskom polju koje je toliko jako da zaokrene polje, onda će se transfer funkcija polariteta preokrenuti. Kako bi prešli preko ove dvosmislenosti, polaritet bi trebao biti utvrđen prije mjerenja. To može biti izvedeno momentalnom primjenom jakog magnetskog polja uzduž lake osi AMR mosta. Neki komercijalni AMR mostovi dolaze s ugrađenom metodom ove izvedbe.

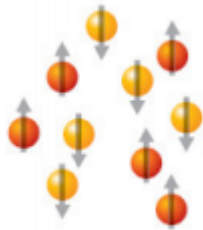


5.7. Transfer funkcija tipičnog AMR mostnog senzora[17]

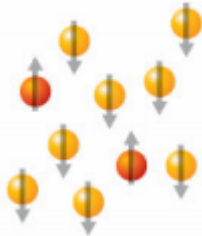
**2. Gigantski magnetootpornik (GMR)** je neovisno i istovremeno otkriven 1988. godine od strane francuskog fizičara Alberta Fert i njemačkog Petera Grünberga. Gigantski magnetootpor je zadužen za proizvodnju senzora ultra osjetljivog magnetskog polja koji se koristi kao glava čitača tvrdog diska na računalima. Ova aplikacije je puštena u trgovine 1997. godine od strane IBM-a i Hitachi-a. Za ovo otkriće, Albert Fert i Peter Grünberg su primili Nobelovu nagradu iz fizike 2007. godine. Elektronika je bazirana na temeljnim svojstvima elektrona: njihov električni nosač i struja koju električni nosači proizvode tijekom premještanja. „Spintronics“ (elektronika vrtnje) koristi drugo svojstvo elektrona: njegov magnetski moment to jest vrtnju („spin“).

Vrtnja elektrona: elektron se nalazi u sferi s negativnim nosačem. Elektron se okreće oko jezgre atoma i oko svoje osi, ali svaki nosač u pokretu stvara magnetsko polje. Vrtnju opisuje magnetsko polje stvoreno kretanjem elektrona oko svoje osi. Postoje elektroni vrtnje koji su mali magneti koji se mogu okrenuti prema:

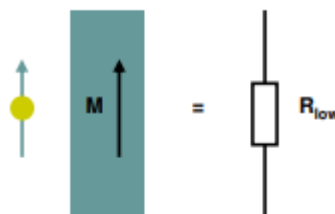
- Prema gore („spin up“),
- Prema dolje („spin down“).
- U nemagnetskim materijalima  
Prema gore = prema dolje



- U magnetskim materijalima  
Prema gore  $\neq$  prema dolje

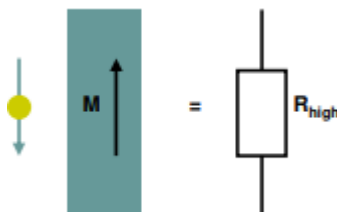


U magnetskim materijalima, kretanje elektrona strogo ovisi o magnetizaciji koja upravlja orijentacijom vrtnje. Ako je orijentacija vrtnje paralelna s magnetizacijom: kretanje je olakšano i materijal pokazuje manju otpornost.



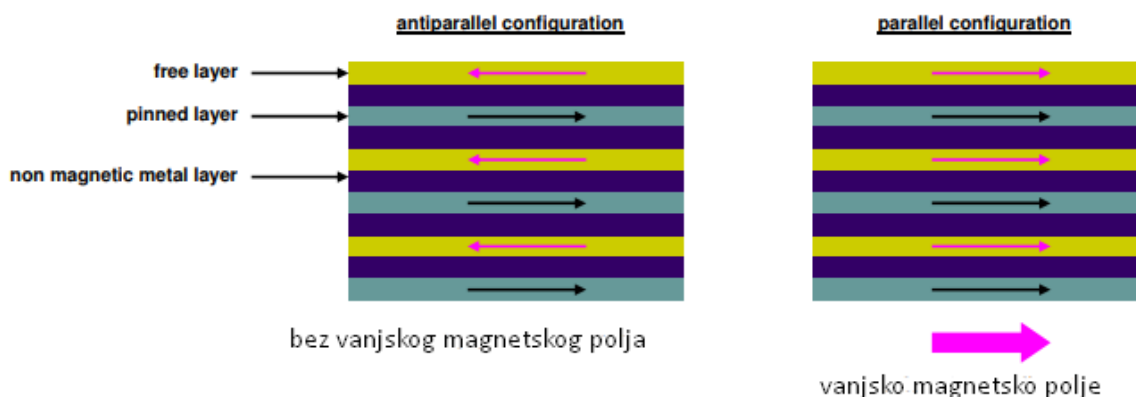
5.8. Prikaz kretanja elektrona paralelno s magnetizacijom

Ako je orijentacija vrtnje antiparalelna s magnetizacijom: kretanje je otežano i materijal pokazuje veću otpornost.



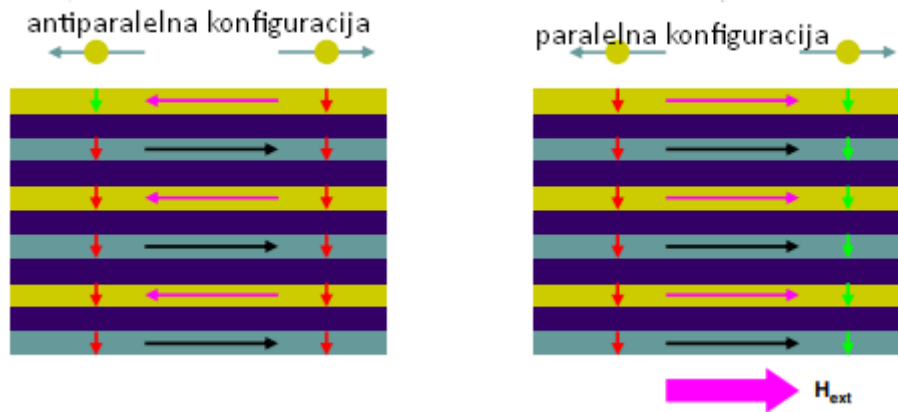
### 5.9. Prikaz kretanja elektrona antiparalelno s magnetizacijom

Gigantski magnetootpornik se sastoji od izmjeničnih slojeva s postavljenom magnetizacijom (zvano „pinned layers“ to jest „prikvačeni slojevi“) i slojeva s magnetizacijom koji se poravnavaju sami uz vanjsko magnetsko polje (zvano „free layers“ to jest „slobodni slojevi“).



### 5.10. Prikaz slojeva gigantskog magnetootpornika[18]

Magnetski slojevi se ponašaju poput filtera za vrtnju sa suprotnom orijentacijom.



### 5.11. Prikaz ponašanja slojeva gigantskog magnetootpornika[18]

U osnovi, rezultirajući otpor [R] može biti napisan prema kutu [ $\theta$ ] između magnetizacija [1-9].

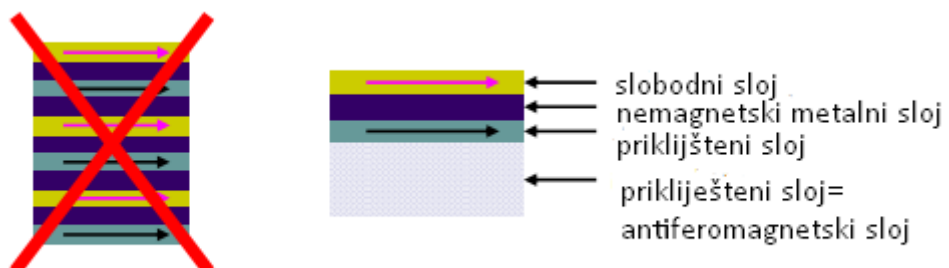
$$R = \frac{R_P + R_{AP}}{2} + \frac{R_P - R_{AP}}{2} \cos\theta \quad (9-9)$$

Antiparalelna konfiguracija:  $\theta = 180^\circ \Rightarrow \cos\theta = -1 \Rightarrow R = R_{AP} = R_{high}$

Paralelna konfiguracija:  $\theta = 0^\circ \Rightarrow \cos\theta = 1 \Rightarrow R = R_P = R_{low}$

Prvo korištenje je bilo kao glava čitača na tvrdom disku u računalima.

Vrtni ventili su koristili samo dva sloja. Prikliješteni antiferomagnetski sloj teži držanju magnetizacije susjednog feromagnetskog sloja fiksiranog smjera. Sloj na vrhu je slobodan za rotiranje magnetizacije na odgovarajuće polje.

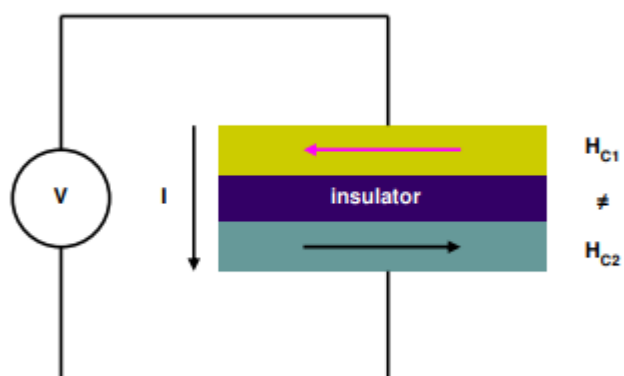


### 5.12. Struktura slojeva vrtnog ventila[18]

U ispravno pristranom centrifugalnom ventilu, ostale pozicije triju slobodnih sloja su napravljene okomito na priklještenu sloj kako bi se dobila maksimalna osjetljivost.

### 3. Tunelski magnetootpor (TMR)

Struktura:



5.13. Način rada tunelskog magnetootpora[19]

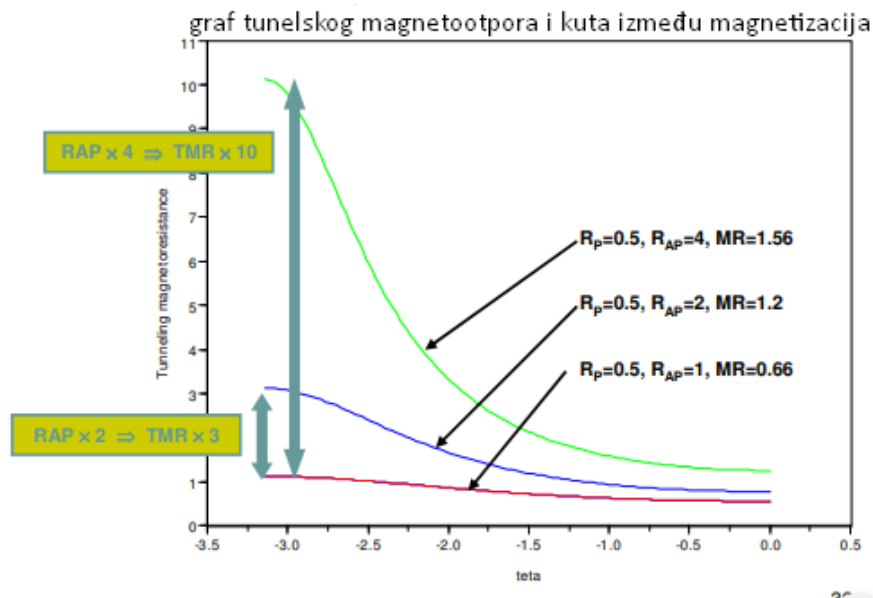
Rad: vrti se s odgovarajućim polarizacijskim prolazom kroz prepreku pomoću tunelskih efekata. Prepreka: visina, širina, materijal.

Tunelski magnetootpor[19]:

$$R(\theta) = R_0 \frac{1}{1 + \frac{MR}{2} \cos \theta}$$

$$R_0 = \frac{R_{AP} + R_P}{2}$$

$$MR = \frac{2(R_{AP} - R_P)}{R_{AP} + R_P}$$



Analitika modela:

$MR, R_{AP}, R_P = f$  ( polarizacija vrtnje, tunelski efekt, svojstva barijere). Prvi model predložen od strane Jullière vrijedi za barijere velikih potencijala. Drugi model predložen od strane Slonczewski ( 1989. godine) uzima u obzir i svojstva barijere. Efekti primjene potencijala: TMR se smanjuje dok se primijenjeni potencijal povećava. Efekt temperature: TMR se smanjuje dok se temperatura povećava.

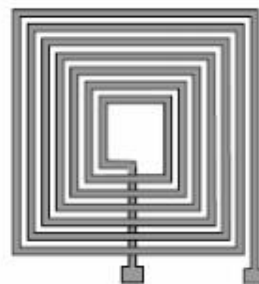
## 5.4. Senzori indukcijske zavojnice



najjednostavniji senzor baziran na zavojnici



koncept s tri međusobno okomite zavojnice za mjerenje magnetskog polja



primjer zavojnice s planarnim tankim filmom

[20] Njihova transfer funkcija  $V = f(B)$  je rezultat iz temelja Faraday-vog zakona indukcije [2-1]:

$$V = -n \frac{d\phi}{dt} = -nA \frac{dB}{dt} = -\mu_0 nA \frac{dH}{dt} \quad (2-1)$$

[n] je broj okreta, [ $\phi$ ] je magnetski tok, [A] je područje zavojnice, [B] je magnetska indukcija, [H] je magnetsko polje,  $\mu_0 (= 4\pi \cdot 10^{-7})$  je vakuum propusnosti. Velika osjetljivost zavojnice može biti dobivena korištenjem velikog broja okreta [n] i velikog aktivnog polja [A]. Minijaturizacija: ugradnja feromagnetske jezgre, koja služi kao koncentrador toka u zavojnici [2-2]:

$$V = -\mu_0 \mu_r nA \frac{dH}{dt} \quad (2-2)$$

$\mu_r$  je propusnost feromagnetskog materijala. Rezultirajuća propusnost jezgre [ $\mu_c$ ] može biti puno niža nego propusnost materijala [ $\mu_r$ ] zbog demagnetizacijskog polja [2-3]:

$$\mu_c = \frac{\mu_r}{1 + N(\mu_r - 1)} \quad (2-3)$$

Demagnetizacijski faktor [N] ovisi o obliku feromagnetske jezgre. Prednost feromagnetskog materijala je poboljšanje osjetljivosti senzora dok je nedostatak degradacija linearnosti. Faktori nelinearnosti ovise o temperaturi, frekvenciji, toku, gustoći,... Dodatni magnetski zvukovi također smanjuju rezoluciju senzora. Feromagnetska jezgra također mijenja distribuciju istraživanog magnetskog polja. Formula za osjetljivost je [2-4]:

$$S = \frac{V}{H} \left( V, \frac{m}{A} \right) \quad (2-4)$$

Rezolucija senzora zavojnice je ograničena termalnom bukom  $V_T$  [2-5]:

$$V_T = 2\sqrt{k_B \times T \times \Delta f \times R} \quad (2-5)$$



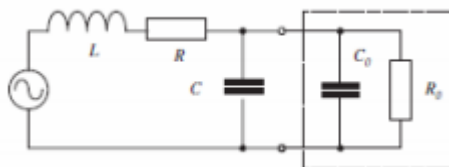
$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ W.s.K}^{-1}$  je Boltzmann-ova konstanta,  $[T]$  je temperatura u kelvinima,  $[\Delta f]$  je frekvencija propusnosti,  $[R]$  je otpor zavojnice. Signal- do- buke (SNR) senzora zavojnice je [2-6]:

$$SNR = \frac{V}{V_t} \quad (2-6)$$

Frekvencijski odziv: očigledno je da iz izraza za napon  $[V = -n \cdot d\phi/dt]$  kako bi se dobio izlazni naponski signal iz senzora, gustoća toka mora varirati s vremenom. Stoga, senzori zavojnice su sposobni za mjerenje samo dinamičnih (AC) magnetskih polja. Ako je izmjerena gustoća toka sinusoida  $[b = B_m \cdot \sin(\omega t)]$  [2-7]:

$$V = -nA \frac{dB}{dt} = nAB_m \times 2\pi f \quad (2-7)$$

Izlazni signal ovisi linearno o frekvenciji, ali zbog unutrašnjeg otpora  $[R]$ , induktivnost  $[L]$  i kapacitivnost  $[C]$  senzora, ovisnost  $[V = f(f)]$  je dodatno složena.



#### 5.14. . Ekvivalentni krug senzora zavojnice opterećenog s kapacitetom $[C_0]$ i otpornikom $[R_0]$

Izlazni signal se povećava, u početku skoro linearno s frekvencijom mjerenog polja, sve do rezonantne frekvencije [2-8]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2-8)$$

Iznad rezonantne frekvencije utjecaj kapacitivnosti  $[C]$  uzrokuje da izlazni signal opada. Analiziranjem ekvivalentnog kruga, osjetljivost  $[S = V/H]$  se može izraziti kao [2-9]:

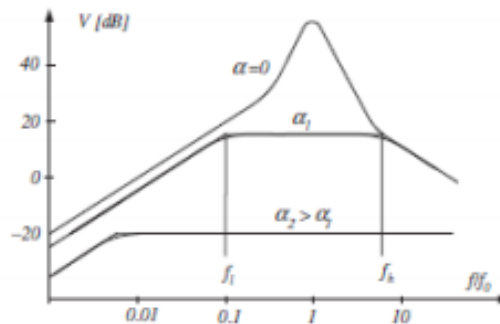
$$S = \frac{S_0}{\sqrt{(1 + \alpha^2) + \left(\beta^2 + \frac{\alpha^2}{\beta^2} - 2\right)\gamma^2 + \gamma^4}} \quad (2-9)$$

Senzor opterećen s malim otporom [R<sub>0</sub>] izlaže karakteristike frekvencije s visinom između nisko ugaone frekvencije [f<sub>L</sub>] i visoko ugaone frekvencije [f<sub>H</sub>] [2-10,11]:

$$f_L = \frac{R + R_0}{2\pi L} \quad (2-10)$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi R_0 C} \quad (2-11)$$

Metoda za poboljšanje ponašanja frekvencije senzora je ta da se optereti senzor s jako malim otporom [R<sub>0</sub>]. Za nisku vrijednost teretnog otpora [R<sub>0</sub>] (visoka vrijednost koeficijenta) možemo upravljati visinom frekvencije karakteristike, zvana samo-integrirajući mod.



frekvencijski odziv senzora induksijske zavojnice opterećenog s R<sub>0</sub> i C<sub>0</sub>

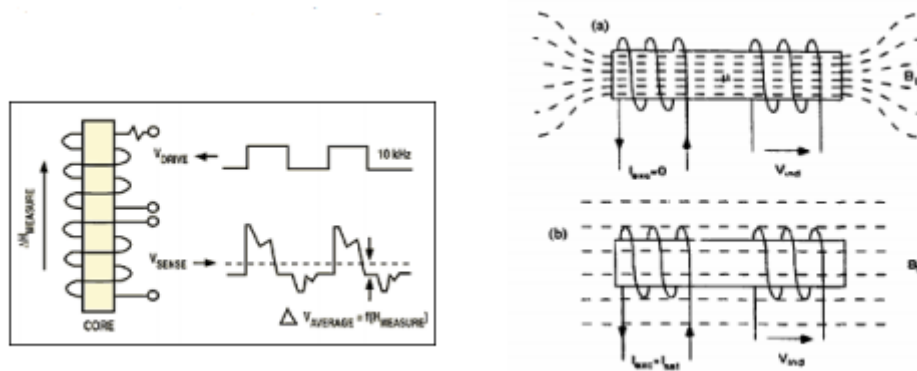
Veza integrirajućeg pretvarača sa izlazom senzora ili dodavanje povratnog kruga su druge metode za poboljšanje frekvencijskog ponašanja senzora. Prednosti senzora induksijske zavojnice su: Jednostavnost rada i dizajna, široka frekvencija propusnosti, velika dinamika. Neki nedostaci su: osjetljivost samo na magnetska polja izmjenične struje, izlazni signal ne ovisi o vrijednosti magnetskog polja nego na derivaciji tog polja. Stoga je izlazni signal ovisan o frekvenciji. Prilično je teško minijaturizirati senzor

indukcijske zavojnice jer mu osjetljivost ovisi o području senzora. Štoviše, senzori mikro-zavojnice mogu biti realizirane korištenjem tehnika tankih slojeva.

## 5.5. „Fluxgate“ (vrata toka)

Osnovni „fluxgate“ se sastoji feromagnetske jezgre umotane u dvije zavojnice:

- Glavna ili zavojnica uzbude
- Sporedna ili pokupljena zavojnica



5.15. Strukturna shema „fluxgate“ senzora [21]

Jezgrina magnetska indukcija se mijenja sa prisutnosti vanjskog magnetskog polja.

Uzbuđenost: izmjenična struja  $[I_{exc}]$  pri frekvenciji  $[f_0]$  je primjenjena na primarnu zavojnicu. Amplituda uzbude je dovoljna za zasićenost feromagnetske jezgre.

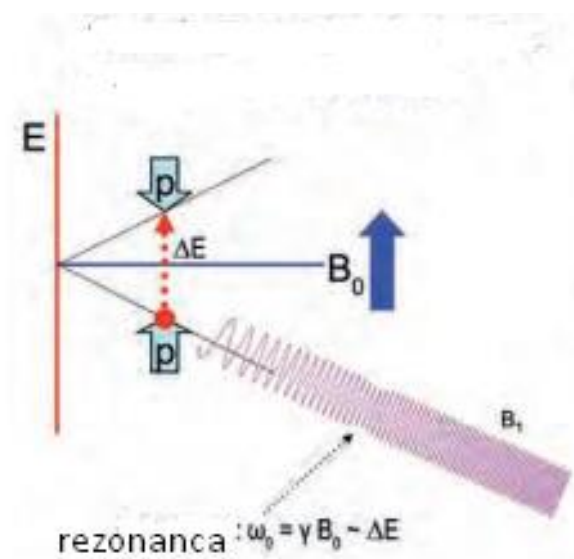
Izlazni signal: sporedni namot daje izlazni signal koji je spojen kroz jezgru s primarnim namotom. Signal je pod utjecajem promjena jezgrine propusnosti i prikazuje se kao amplitudna varijacija u očitavanju izlaza zavojnice (Faradayev zakon). Signal može biti demoduliran s detektorom osjetljivosti faza i filtriran za dobivanje vrijednosti magnetskog polja. Prednosti „fluxgate“ su: robusnost, pouzdanost, stabilnost, niska razina buke. Neki od nedostataka su: ovakvi uređaji su uglavnom glomazni i njihova integracija je teška. „fluxgate“ treba imati povezan elektronički krug. U mogućnosti su mjeriti DC ili sporo varirajuće polje. U smislu opsega i rezolucije, spadaju u kategoriju magnetskih senzora između Hall-ovih uređaja i jako skupih senzora baziranih na kvantnim efektima („SQUID“).

Signal „fluxgate“ je amplitudno-modulirani potisnuti nosački signal koji je sinkron s drugim harmonikom uzbuđenog signala. U jednostavnim nisko-energetskim magnetometrima, signal je konvertiran u bazni pojas korištenjem sinkronog demodulatora, filtriran i predstavljen kao završni izlaz. Preciznost magnetometara koji koriste arhitekturu otvorene petlje je ograničen linearnosti jezgrine magnetizacijske krivulje i to je oko 5% za aplikacije na zemljinom polju (60  $\mu\text{T}$ ). Precizniji i stabilniji magnetometri koriste povratne informacije magnetnog polja radije nego strukture otvorene petlje opisane gore.

## 5.6. Senzor nuklearne magnetske rezonance (NMR)

Među desecima fizičkih instrumenata koji su stvoreni za mjerenje jačine magnetskog polja, NMR je dosad najprecizniji od svih. Uz to NMR magnetometar je otporan na temperaturu i starost. Zbog tih razloga oni su u širokoj primjeni za kalibriranje drugih magnetometara kao što je najpoznatiji Hall-ov gaussmetar. Međutim, zbog tehnoloških ograničenja njihovo korištenje je bilo ograničeno na svega par industrijskih aplikacija.

Komercijalni NMR magnetometri su postali dostupni u isto vrijeme kao i MRI. Princip rada je sljedeći: ako čestica ima svoju vrtnju, ona će se ponašati kao igla malog kompasa i uskladiti će se s magnetskim poljem. Kvantno-mehanički pričajući, čestica ima dva energetska stanja: stanje niske energije gdje je nuklearno magnetski moment usklađen s vanjskim poljem i stanje visoke energije gdje je obrnuto. Praznina između ta dva polja ovisi jedino o magnitudi magnetskog momenta i magnetskog polja. Pošto je nuklearna magnetska energija konstanta, ova energijska praznina je savršena za mjerenje jačine magnetskog polja.



5.16. Slika tranzicije energetske razine [22]

Kao u spektroskopiji, ubacivanjem energije točno određene vrijednosti izazvalo bi česticu na tranziciju iz stanja niske energije u stanje visoke energije. Ubačena energija je proporcionalna njenog frekvenciji tako da se magnetsko mjerenje preko NMR-a sastoji od traženja rezonantne frekvencije koja potiče vrtnju čestica na preklapanje.

Zahtjevi NMR-a: NMR može odraditi mjerenja magnetskog polja s apsolutnom preciznošću od 0.1[ppm]. Međutim, određeni zahtjevi moraju biti ispunjeni:

- Polje mora biti stabilno (<1% po sekundi)
- Polje mora biti homogeno (<1% po centimetru):
  1. Signal se pogoršava; teško za zaključavanje
  2. Preciznost pozicioniranja sonde postaje kritično

Postoji i dodatna mogućnost mjerenja u nehomogenim poljima mijenjanjem određenih zavojnica.

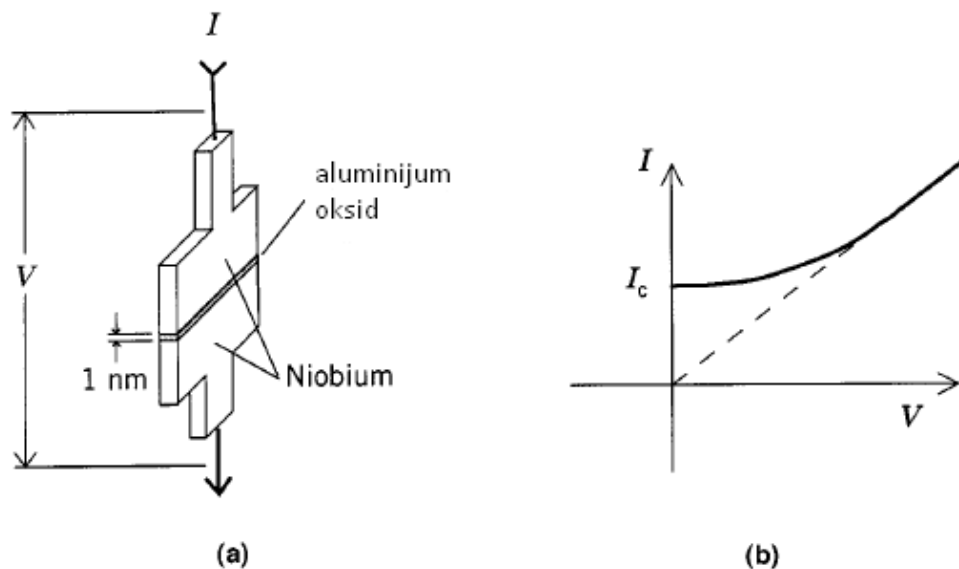
## 5.7. „SQUID“ Magnetometri

Brian D. Josephson 1962. godine, dok je studirao na Sveučilištu Cambridge, predvidio je da super vodljiva struja može teći između dva super vodiča koji su odvojeni tankim slojem izolacije. Opseg ove super vodljive (kritične) struje kroz „Josephove raskrsnice“ je pod utjecajem magnetskog polja i tako stvara bazu za „SQUID“ magnetometar.

Slika 5.17. ilustrira generalnu strukturu Josephove raskrsnice i naponsko-strujnu vezu (V-I). Dva super vodiča su razdvojena s jako tankim slojem izolatora (aluminijev oksid). Debljina tog sloja je 1 [nm]. Kada je temperatura zavojnice reducirana na ispod 4.2K ( -269 stupnjeva celzijevih), super vodljiva struja će proteći raskrsnicom s 0 [V]. Veličina ove struje, zvana kritična struja [ $I_c$ ], je periodička funkcija magnetskog toka prezentiranog u raskrsnici. Njegov maksimum se javlja za vrijednost toka jednakom [ $n\phi_0$ ], gdje [ $\phi_0$ ] je jedan kvantni tok ( $2[f\hbar]$ ), a minimum se javlja za vrijednost toka jednakom [ $(n + \frac{1}{2})\phi_0$ ]. Perioda je jedan kvantni tok. Ovaj fenomen se zove „ dc Josephon efekt“ i to je samo jedan od njegovih efekata.

Magnetometri bazirani na super vodljivom kvantnom miješanom uređaju (SQUID) su trenutno najosjetljiviji instrumenti dostupni za mjerenje jačine magnetskog polja. SQUID

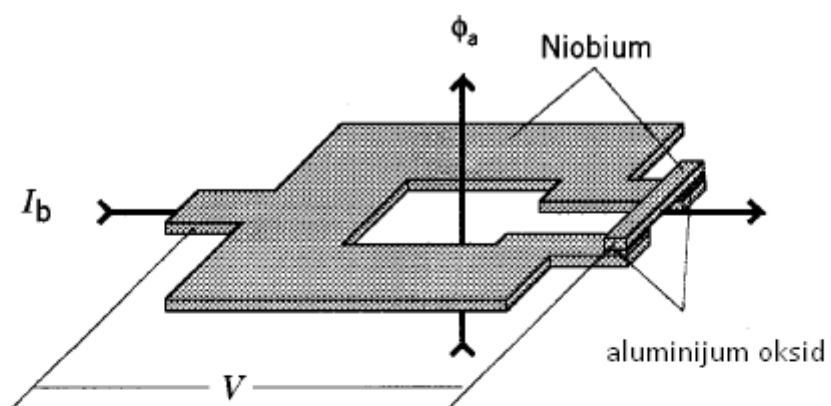
magnetometri mjere promjenu u magnetskom polju od neke proizvoljne razine polja; oni ne mjere intrinzično apsolutnu vrijednost polja. Bio-medicinsko istraživanje je najvažnija korisnost SQUID magnetometara. SQUID magnetometri i gradiometri (mjere prostornu varijaciju magnetskog polja) imaju veliku osjetljivost potrebnu za mjerenje niskog magnetskog polja generiranog od strane tijela.



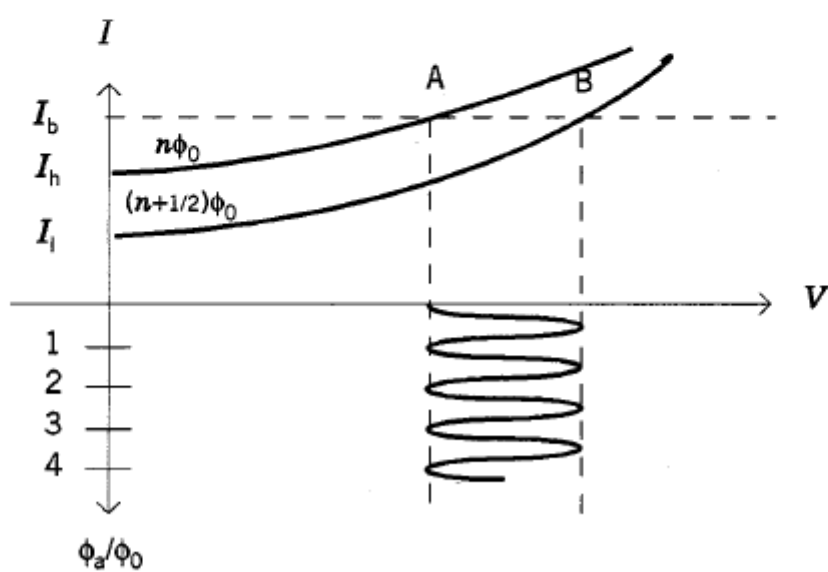
5.17. Prikaz Josephove raskrsnice (a) i njezin graf (b) [23]

Druge mogućnosti korištenja uključuje paleomagnetiku (mjerenje ostataka magnetizma u kamenju) i za mjerenje otpornosti Zemlje.

Slika 5.18. je blok dijagram jedne implementacije dc SQUID magnetometra koji ima široku primjenu pri dinamičnim mjerenjima polja. Velika super vodljiva petlja, koja je izložena magnetskom polju koje se mjeri, je spojena na više okretni signalni namotaj koji je magnetski sparn na SQUID. Pri kriogenim temperaturama, petlja i signalni namotaj efektivno tvore dc induksijsku zavojnicu. Vanjski tok dodan zavojnici će generirati struju u petlji koja će održavati mrežu toka s petljom konstantnom, čak i za magnetska polja s istosmjernom strujom. Signalni namotaj povećava tok koji je korišten za SQUID.



(a)



(b)

5.18. Prikaz dc SQUID magnetometra (a) i graf oscilacije napona s periodom jednog kvantnog toka (b) [23]

## 6. TOČNOST MJERENJA

Sva mjerenja koja se odrade se zapisuju kako bi bila korisna pri donošenju određenih odluka. Niti jedno mjerenje neće biti napravljeno ako već postoji „rezultat“ za to mjerenje. Kako bi rezultati mjerenja bili korisni neophodno je da greške mjerenja budu što manje u usporedbi s promjenama.

Greška se definira kao razlika između izmjerene vrijednosti i istinite vrijednosti mjerenja.

$$E = (\text{izmjereno}) - (\text{istina})$$

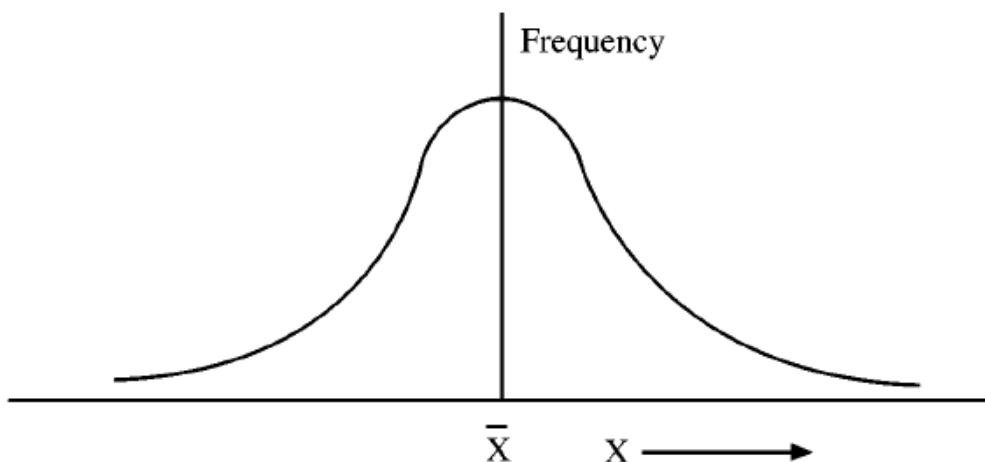
Gdje je E = mjerna greška

(izmjereno) = vrijednost dobivena mjerenjem

(istina) = prava vrijednost mjerenja

To je jedino moguće procijeniti, s nekom pouzdanosti, očekivani limit greške. Najpoznatija metoda procjene tog limita je normalna distribucija [3-1].

$$Y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(x-\mu)^2/\sigma^2} \quad (3-1)$$



6.1. Graf normalne distribucije [24]



Gdje je X = varijabla ulaza

$\mu$  = prosjek ponovljivosti varijable X

$\sigma$  = standardna devijacija ponovljivosti izražena kao[3-2]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{n}} \quad (3-2)$$

Gdje je  $X_i$  = i-to mjerenje

n= broj mjerenja

Slika 6.1. prikazuje tu distribuciju. Ovdje, za beskonačan broj ponavljanja ( $N=\infty$ ), standardna devijacija  $\sigma$  će procijeniti očekivani limit određene greške uz neku pouzdanost. To je prosjek, plus ili minus  $2\sigma$  podijeljen s korijenom vrijednosti mjerenja. Sadržavati će istiniti prosjek,  $\mu$ , u 95% slučajeva.

## 6.1. Klasifikacija pogreške i izvor nesigurnosti

Postoje dva klasifikacijska sistema koji se koriste. Posljednja i konačna izračunata nesigurnost s pouzdanosti je identična bez obzira koji klasifikacijski sistem koristimo. Dvije klasifikacije korištene su ISO klasifikacija i inženjerska. Njihove pogreške i njihove nesigurnosti po tipu, ovise je li postoje dostupni podaci za računanje standardne devijacije za posebnu grešku i njenu nesigurnost. Druge pogreške i nesigurnosti ovise o njihovom efektu na eksperiment ili test. Zbog toga inženjersku klasifikaciju dijelimo na slučajni tip i sistematski tip, s indeksima koji označavaju je li postoje podaci za mjerenje standardne devijacije ili ne, za posebnu pogrešku ili izvor nesigurnosti. Iz tog razloga, inženjerska klasifikacija je u većoj uporabi.

## 6.2. ISO klasifikacija

Ova klasifikacija pogreške i nesigurnosti nije preporučena u ovom poglavlju ali ima svoj udio u završnom računu s preporučenim klasifikacijskim sistemom (inženjerskom klasifikacijskom sistemu). U ovom ISO sistemu, pogreške i nesigurnosti su klasificirane kao tip A, ako postoje podaci za računanje standardne devijacije i tip B ako ne postoje.

Tip A, podaci za računanje standardne devijacije[3-3]:

$$U_A = \left[ \sum_{t=1}^{N_A} (\theta_t U_{A_t})^2 \right]^{1/2} \quad (3-3)$$

Gdje je  $U_{A_i}$  = standardna devijacija bazirana na podacima

$N_A$  = broj parametara s tipom A nesigurnosti

$\theta_i$  = osjetljivost testa ili mjernog rezultata

I tip B (bez podataka za standardnu devijaciju)[3-4]:

$$U_B = \left[ \sum_{t=1}^{N_B} (\theta_t U_{B_t})^2 \right]^{1/2} \quad (3-4)$$

Gdje je  $U_{B_i}$  = standardna devijacija (bazirana na procjeni, ne na podacima)

$N_B$  = broj parametara s tipom B nesigurnosti

$\theta_i$  = osjetljivost testa ili mjernog rezultata

Jednadžba ISO klasifikacije će pružiti istu završnu nesigurnost kao i inženjerska klasifikacija ali ISO klasifikacija ne pruža pregled koji bi poboljšao eksperimentnu ili testnu nesigurnost.

Inženjerska klasifikacija koju ćemo sada obraditi se više preporuča od ove klasifikacije.

### 6.3. Inženjerska klasifikacija

Inženjerska klasifikacija prepoznaje da eksperiment ili test ima dva glavna tipa pogreške čije granice su procijenjene s pogreškom pri nekoj pouzdanosti. Te grupe pogrešaka su podijeljene na slučajne i sistematske.

#### Slučajna

Glavni izraz za slučajnu nesigurnost je ( $1S_x$ ) standardna devijacija prosjeka[3-5]:

$$S_{\bar{x},R} = \left[ \sum_{T=A}^B \sum_{l=1}^{N_{l,T}} (\theta_l S_{\bar{x}_{l,T}})^2 \right]^{1/2} = \left[ \sum_{T=A}^B \sum_{l=1}^{N_{l,T}} (\theta_l S_{\bar{x}_{l,T}} / \sqrt{M_{l,T}})^2 \right]^{1/2} \quad (3-5)$$

Gdje je  $S_{X_{l,T}}$  = standardna devijacija i-te slučajne pogreške

$S_{X,R}$  = slučajna nesigurnost mjerenja

$N_{i,T}$  = konačni broj slučajnih nesigurnosti

$M_{i,T}$  = prosječna vrijednost podataka

$\theta_i$  = osjetljivost testa ili mjernog rezultata

#### Sistematska

Sistematska glavna jednažba je [3-6]:

$$B_R = \left\{ \left[ \sum_{T=A}^B \sum_{i=1}^{N_T} [(\theta_i B_{i,T})^2 + \sum_{j=1}^{N_T} \theta_i \theta_j B_{(i,T),(j,T)} (1 - \delta_{i,j})] \right] \right\}^{1/2} \quad (3-6)$$

Gdje je  $B_{i,T}$  = i-ti parametar sistematske nesigurnosti

$B_R$  = sistematska nesigurnost mjerenja

$N$  = konačni broj sistematskih nesigurnosti

$\theta_i$  = osjetljivost testa ili mjernog rezultata i-te sistematske nesigurnosti

$\theta_j$  = osjetljivost testa ili mjernog rezultata j-te sistematske nesigurnosti

T = indeks ili brojač za ISO tip nesigurnosti

l = indeks ili brojač za uobičajeni izvor nesigurnosti

Slučajna nesigurnost (prva jednađžba) i sistematska nesigurnost (druga jednađžba) moraju biti udružene kako bi se dobila jednađžba totalne nesigurnosti[3-7]:

$$U_{R,ENG} = t_{95} \left[ \left( \frac{B_R}{2} \right)^2 + (S_{\bar{x},R})^2 \right]^{1/2} \quad (3-7)$$

## 7. ZAKLJUČAK

Zadatak završnog rada je bio proučiti i dati opis mjerenja svih magnetskih veličina i pregled svih vrsta instrumenata. Navesti i opisati sve poznate metode magnetskih mjerenja koje se danas primjenjuju, vrste magnetskih senzora te njihovu primjenu, prednosti i nedostatke. Izrada ovog završnog rada zahtijevala je puno istraživanja o magnetima općenito. Pri izradi je korištena mnogobrojna literatura na stranom jeziku kao što se može i vidjeti tijekom čitanja ovog dokumenta.

Magneti općenito imaju veliku primjenu u ljudskim životima pa je stoga trebalo doći i do načina kako to mjeriti i klasificirati. Prvi je to otkrio Michael Faraday 1831. godine i taj događaj je označio početak tehnologije magnetskih mjerenja od kojih se neki i dan danas koriste. Postoje brojne metode za mjerenje magnetskog polja. Samo neke od njih se stalno koriste za mjerenje akceleratorских magneta. NMR tehnika je standard apsolutne preciznosti, ali se ne može koristiti u svim situacijama. Hall-ove sonde su jako popularne za točkasta mjerenja poput mapiranja polja detektorskih magneta. Razne zavojnice se najčešće koriste kao alat za određivanje kvalitete polja kod akceleratorских magneta. Inovativne tehnike se razvijaju za usklađivanje mjerenja različitim aplikacijama.

## 8. LITERATURA

- [1] J.L. Symonds, "Methods of measuring strong magnetic fields", Rep. Progr. Phys., 18 (1955) 83-126.
- [2] C. Germain, "Bibliographical review of the methods of measuring magnetic fields", Nucl. Instr. and Meth., 21 (1963) 17-46.
- [3] L.W. McKeehan, "The measurement of magnetic quantities", J. Opt. Soc. Amer., 19 (1929) 213-242.
- [4] B.C. Brown, "Fundamentals of magnetic measurements with illustrations from Fermilab, experience", Proc. of the ICFA Workshop on Superconducting Magnets and Cryogenics, Brookhaven National Lab., Upton, USA (May 1986) 297-301.
- [5] B. de Raad, "Dynamic and static measurements of strongly inhomogeneous magnetic fields", Thesis, Delft (1958) 55-67.
- [6] W.C. Elmore, M.W. Garrett, "Measurement of two-dimensional fields, Part I: Theory", Rev. Sci. Instr., 25, (1954) 480-485.
- [7] M.E. Grassot, "Fluxmetre", J. de Phys., 4 (1904) 696-700.
- [8] G.K. Green, R.R. Kassner, W.H. Moore, L.W. Smith, "Magnetic measurements", Rev. Sci. Instr., 24 (1953) 743-754.
- [9] D. Swoboda, "The polar co-ordinate magnetic measurement system for the axial field spectrometer magnet at the ISR-CERN", IEEE Trans. on Magn., MAG-17 (1981) 2125-2128.
- [10] M.W. Poole, R.P. Walker, "Hall effect probes and their use in a fully automated magnetic measuring system", IEEE Trans. on Magn., MAG- 17 (1981) 2129-2132.
- [11] J. Hauesler, H.J. Lippmann, "Hallgeneratoren mit kleinem Linearisierungsfehler", Solid State Electron., 11 (1968) 173-182.
- [12] J. Babiskin, "Oscillatory galvanomagnetic properties of bismuth single crystals in longitudinal magnetic fields", Phys. Rev., 107 (1957) 981-992.

- [13] C.D. Cox, "An a.c. Hall effect gaussmeter", J. Sci. Instr., 41 (1964) 695-691.
- [14] K.R. Dickson, P. Galbraith, "A digital micro-teslameter", CERN 85-13 (1985).
- [15] J. Malecki, M. Surrna, J. Gibalewicz, "Measurements of the intensity of transient magnetic fields by the Faraday effect", Acta Phys. Polon., 16 (1957) 151-156.
- [16] SHEME Hall-ovog senzora dostupne na URL:  
[https://www.google.hr/search?q=hall+sensor+schematic&tbm=isch&ved=2ahUKEwjpo\\_3XhN7nAhVDeRoKHR0wC3oQ2-cCegQIABAA&oq=hall+sensor+s&gs\\_l=img.1.2.0i19l8j0i30i19j0i8i30i19.20590.21157..23512...0.0..0.125.241.0j2.....0....1..gws-wiz-img.....0j0i30.QFleeBG-STE&ei=a2JNXqnCCMPyaZ3grNAH&bih=937&biw=1920](https://www.google.hr/search?q=hall+sensor+schematic&tbm=isch&ved=2ahUKEwjpo_3XhN7nAhVDeRoKHR0wC3oQ2-cCegQIABAA&oq=hall+sensor+s&gs_l=img.1.2.0i19l8j0i30i19j0i8i30i19.20590.21157..23512...0.0..0.125.241.0j2.....0....1..gws-wiz-img.....0j0i30.QFleeBG-STE&ei=a2JNXqnCCMPyaZ3grNAH&bih=937&biw=1920)
- [17] SHEME AMR senzora dostupne na URL :  
[https://www.google.hr/search?q=anisotropic+magnetoresistance+\(amr\)+sensor&tbm=isch&ved=2ahUKEwiqtJXZhd7nAhWB\\_4UKHSRqA7YQ2-cCegQIABAA&oq=anisotropic+magnetoresistance+\(amr\)+sensor&gs\\_l=img.3...28233.31719..31984...0.0..0.122.757.0j7.....0....1..gws-wiz-img.....0i30.8qHBHoYw-tM&ei=emNNXqqPBIH\\_lwSk1I2wCw&bih=937&biw=1920](https://www.google.hr/search?q=anisotropic+magnetoresistance+(amr)+sensor&tbm=isch&ved=2ahUKEwiqtJXZhd7nAhWB_4UKHSRqA7YQ2-cCegQIABAA&oq=anisotropic+magnetoresistance+(amr)+sensor&gs_l=img.3...28233.31719..31984...0.0..0.122.757.0j7.....0....1..gws-wiz-img.....0i30.8qHBHoYw-tM&ei=emNNXqqPBIH_lwSk1I2wCw&bih=937&biw=1920)
- [18] SHEME GMR senzora dostupne na URL:  
[https://www.google.hr/search?q=gigantic+magnetoresistance+sensor&tbm=isch&ved=2ahUKEwiY1Lf3ht7nAhUV\\_4UKHaaRC3gQ2-cCegQIABAA&oq=gigantic+&gs\\_l=img.1.0.35i39j0i19i9.6211.6468..8359...0.0..0.121.235.0j2.....0....1..gws-wiz-img.....0j0i30.1fHp-GCvi28&ei=xWRNXtjdO5X-lwSmo67ABw&bih=937&biw=1920](https://www.google.hr/search?q=gigantic+magnetoresistance+sensor&tbm=isch&ved=2ahUKEwiY1Lf3ht7nAhUV_4UKHaaRC3gQ2-cCegQIABAA&oq=gigantic+&gs_l=img.1.0.35i39j0i19i9.6211.6468..8359...0.0..0.121.235.0j2.....0....1..gws-wiz-img.....0j0i30.1fHp-GCvi28&ei=xWRNXtjdO5X-lwSmo67ABw&bih=937&biw=1920)
- [19] SHEME TMR senzora dostupne na URL:  
[https://www.google.hr/search?q=colossal+magnetoresistance&tbm=isch&ved=2ahUKEwiXpIWOiN7nAhUDnRoKHRzKD0wQ2-cCegQIABAA&oq=magnetoresistance+&gs\\_l=img.1.9.0i19l6j0i30i19j0i5i30i19i3.5184.22934..33836...17.0..0.133.3092.0j26.....0....1..gws-wiz-img.....10..35i39j0i67j0j35i362i39j0i131j0i10i19.Kv3LDJacU\\_s&ei=AWZNXtefMoO6apyUv-AE&bih=937&biw=1920](https://www.google.hr/search?q=colossal+magnetoresistance&tbm=isch&ved=2ahUKEwiXpIWOiN7nAhUDnRoKHRzKD0wQ2-cCegQIABAA&oq=magnetoresistance+&gs_l=img.1.9.0i19l6j0i30i19j0i5i30i19i3.5184.22934..33836...17.0..0.133.3092.0j26.....0....1..gws-wiz-img.....10..35i39j0i67j0j35i362i39j0i131j0i10i19.Kv3LDJacU_s&ei=AWZNXtefMoO6apyUv-AE&bih=937&biw=1920)
- [20] SHEME senzora indukcijske zavojnice dostupne na URL:  
<https://www.google.hr/search?q=inductive+sensor+example&tbm=isch&ved=2ahUKEwj29p>

[L4iN7nAhXH4YUKHSGTC94Q2-](#)

[cCegQIABAA&oq=inductive+sensor+example&gs\\_l=img.3...13029.16387..16510...0.0..0.152.412.0j3.....0....1..gws-wiz-](#)

[img.....0i8i30j0i24.peT5we0T99I&ei=4GZNXvaGFcdlwShpq7wDQ&bih=937&biw=1920](#)

[21] Strukturna shema „fluxgate“ senzora dostupna na URL:  
[https://www.google.hr/search?q=fluxgate++sensor+example&tbm=isch&ved=2ahUKEwjQxpHZid7nAhXV\\_IUKHc1rCFMQ2-](https://www.google.hr/search?q=fluxgate++sensor+example&tbm=isch&ved=2ahUKEwjQxpHZid7nAhXV_IUKHc1rCFMQ2-)

[cCegQIABAA&oq=fluxgate++sensor+example&gs\\_l=img.3...12511.15999..16527...3.0..0.118.1226.0j11.....0....1..gws-wiz-](#)

[img.....35i39.lkWPeQ1K79Y&ei=q2dNXpDFLdX5lwTN16GYBQ&bih=937&biw=1920](#)

[22] Shema za NMR senzor dostupna na URL:  
[https://www.google.hr/search?q=nuclear+magnetic+resonance+\(nmr\)&tbm=isch&ved=2ahUKEwiv8NPhid7nAhUEYBoKHeJmBUQQ2-](https://www.google.hr/search?q=nuclear+magnetic+resonance+(nmr)&tbm=isch&ved=2ahUKEwiv8NPhid7nAhUEYBoKHeJmBUQQ2-)

[cCegQIABAA&oq=nuclear+magnetic+resonance+&gs\\_l=img.1.3.0i19110.153435.157367..163505...0.0..0.159.1483.0j12.....0....1..gws-wiz-](#)

[img.....35i39j0i67j0i30.us3jZJeVgyk&ei=vWdNXu-dJYTAaeLNlaAE&bih=937&biw=1920](#)

[23] Shema SQUID magnetometara dostupna na URL:  
<https://www.google.hr/search?q=squid+magnetometer&tbm=isch&ved=2ahUKEwir-pe0i97nAhUY4RoKHQCZA8oQ2->

[cCegQIABAA&oq=SQUID+magneto&gs\\_l=img.1.0.0i1914j0i30i19.678.30986..33905...10.0..0.179.1843.0j15.....0....1..gws-wiz-](#)

[img.....10..0j0i67j35i39j35i362i39j0i30j0i10i19j0i5i30i19j0i8i30i19.WYMj-7OEsQE&ei=d2lNXuviB5jCa4CytAM&bih=937&biw=1920](#)

[24] Graf normalne distribucije dostupan na URL:  
<https://www.google.hr/search?q=graf+normalne+distribucije&tbm=isch&ved=2ahUKEwiLxLWUjN7nAhUScxoKHbLKBrAQ2->

[cCegQIABAA&oq=graf+normalne+distribucije&gs\\_l=img.3...73214.79707..79829...1.0..0.344.3279.0j26j0j1.....0....1..gws-wiz-](#)

[img.....35i39j0i67j0i19j0i5i30i19j0i8i30i19j0i8i30j0i30j0i5i30.3WR9e-yAziM&ei=QGpNXoukOZLmabKVm4AL&bih=937&biw=1920](#)



## 9. SAŽETAK

### MAGNETSKA MJERENJA

U provedenom završnom radu opisana su magnetska mjerenja, navedene su sve metode magnetskih mjerenja i njihove karakteristike, sva instrumentacija i uređaji koji se koriste za magnetska mjerenja, od njihovog otkrića pa sve do načina rada i uporabe u svakodnevnom životu. Opisan je način računanja točnosti mjerenja i njegove nesigurnosti.

**Ključne riječi:** magnet, mjerenje, polje, senzor, efekt, zavojnica, izolator, detektor, preciznost, osjetljivost, električna struja, napon, otpor, indukcija, impedancija.

## **10. ABSTRACT**

### **MAGNETIC MEASUREMENT**

The final work describes magnetic measurements, list of all methods of magnetic measurements and their characteristics, all instrumentation and devices used for magnetic measurements, their discovery and their use nowadays. The method of calculating accuracy of the measurement and its uncertainties is also described.

**Key words:** magnet, measurement, field, sensor, coil, effect, insulator, detector, precision, sensitivity, electrical current, voltage, resistance, induction, impedance.

## 11. ŽIVOTOPIS

Mario Varga rođen je 16.8.1996.g. u Osijeku. Pohađao je osnovnu školu „Ivana Kukuljevića“ u Belišću, te zatim upisao Srednju školu Valpovo smjer – Opća gimnazija. Prosječan prolazak na maturi je bio dobar i nakon toga, 2014./15. upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, stručni studij smjer – Automatika.

Stručnu praksu u iznosu od 200 sati odradio je u tvrtki TEO-Belišće d.o.o.

Govori engleski jezik i ima položene prve dvije razine njemačkog jezika. Tijekom obrazovanja stekao je digitalne vještine u Microsoft Office, Arduino, winNC sinumerik, AutoCAD, DraftSight i mnogi drugi.

Posjeduje i vozačku dozvolu, dobre komunikacijske vještine, efikasnost, odgovornost, pristupačnost, timski duh , poznavanje tehnologije i dr.