

# Magnetomjerni kompas

---

Zrinjski, Jelena

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:868754>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-31**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

Jelena Zrinjski

MAGNETOMJERNI KOMPAS

Diplomski rad

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ  
FIZIKA I TEHNIKA; SMJER NASTAVNIČKI

**Jelena Zrinjski**

Diplomski rad

# **Magnetomjerni kompas**

Voditelj diplomskog rada: prof. dr. sc. Josip Stepanić

Ocjena diplomskog rada: \_\_\_\_\_

Povjerenstvo: 1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

Datum polaganja: \_\_\_\_\_

Zagreb, 2021.

*Zahvaljujem svom mentoru prof. dr. sc. Josipu Stepaniću na strpljivom vođenju kroz izradu diplomskog rada.*

*Zahvaljujem izv. prof. dr. sc. Damiru Pajiću i doc. dr. sc. Maji Planinić na sugestijama i pomoći pri izradi diplomskog rada.*

*Zahvaljujem asistentici Karolini Matejak Cvenić na pomoći prilikom izvođenja pokusa za metodički dio diplomskog rada.*

*Na kraju zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na povjerenju i podršci tijekom studija.*

## Sažetak

Rad suvremenih navigacijskih instrumenata temelji se na različitim fizikalnim procesima. Primjer takvog instrumenta je magnetomjerni kompas, vrsta kompasa koji mjeri smjer i iznos magnetskog polja. Rad magnetomjernog kompasa temelji se na nelinearnosti magnetizacije magnetskih materijala i elektromagnetskoj indukciji. U radu su opisane karakteristike magnetomjernog kompasa jednostavne strukture. Navedeni su zahtjevi za magnetske materijale koji se upotrebljavaju u magnetomjernom kompasu. Princip rada detaljno je opisan za izvedbu u kojoj se elementarni osjetnik sastoji od dvije feromagnetske jezgre i tri zavojnice. Magnetomjerni kompas uspoređen je s magnetskim kompasom s obzirom na područje primjenjivosti te s obzirom na točnost i preciznost. Zbog cjelovitosti navedena su osnovna svojstva magnetskog polja Zemlje.

Ključne riječi: magnetsko polje, magnetomjerni kompas, magnetski kompas, magnetizacija, elektromagnetska indukcija, feromagnetni

# Fluxgate compass

## Abstract

The operation of modern navigation instruments is based on various physical processes. An example of such an instrument is a fluxgate compass, a type of compass that measures direction and magnitude of magnetic field. The operation of fluxgate compass is based on nonlinearity of magnetization of magnetic materials and electromagnetic induction. Characteristics of a simple structure fluxgate compass are described in this paper. The requirements for magnetic materials used in a magnetometer compass are also given. The paper offers a detailed description of the operating principle of a configuration in which the elementary sensor consists of two ferromagnetic cores and three coils. The fluxgate compass is compared to the magnetic compass in terms of area of applicability and in terms of accuracy and precision. For clarity, the basic properties of the Earth's magnetic field are listed.

Keywords: magnetic field, fluxgate compass, magnetic compass, magnetization, electromagnetic induction, ferromagnets

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Osnovni pojmovi iz magnetizma i elektromagnetske indukcije</b>	<b>2</b>
2.1	Magnetsko polje . . . . .	2
2.2	Magnetizacija materijala . . . . .	5
2.3	Klasifikacija materijala . . . . .	6
2.4	Magnetska histereza . . . . .	10
2.5	Magnetsko polje Zemlje . . . . .	12
2.6	Elektromagnetska indukcija . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Magnetomjerni kompas</b>	<b>20</b>
3.1	Osnovne karakteristike . . . . .	20
3.2	Opis elemenata . . . . .	20
3.3	Princip rada . . . . .	22
3.4	Opis procesa . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Odnos magnetomjernog kompasu i magnetskog kompasu</b>	<b>37</b>
4.1	Osnovne karakteristike magnetskog kompasu . . . . .	37
4.2	Elementi magnetskog kompasu . . . . .	37
4.3	Usporedba magnetskog i magnetomjernog kompasu . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Zaključak</b>	<b>40</b>
<b>6</b>	<b>Metodički dio</b>	<b>41</b>
6.1	Uvod . . . . .	41
6.2	Micro:bit uređaj . . . . .	43
6.3	Nastavna priprema: Magnetsko polje električne struje . . . . .	43
	<b>Literatura</b>	<b>57</b>

# 1 Uvod

Navigacija je disciplina koja se bavi određivanjem položaja i orijentacije referentnog tijela s obzirom na Zemlju. Značajan segment navigacije koristi određivanje svojstava magnetskog polja Zemlje za dobivanje traženih podataka za pozicioniranje u odnosu na Zemlju. Vjerojatno najpoznatiji navigacijski instrument koji koristi magnetska svojstva Zemlje je magnetski kompas. Magnetski kompasi stoljećima su korišteni u navigaciji. U međuvremenu, moderni magnetometri i tehnologije kalibracije kompasa omogućili su da elektronički kompas postane presudan navigacijski instrument, čak i u vrijeme satelitske navigacije [1]. Navigacijski instrument koji na temelju svojstava magnetskog polja Zemlje omogućuje najprecizniju i najtočniju navigaciju je magnetomjerni kompas.

Magnetometri mjere iznos i smjer istosmjernog i niskofrekventnog izmjeničnog magnetskog polja u rasponu od  $10^{-10}$  do  $10^{-4}$  T [2]. Magnetometri danas imaju široku primjenu u znanstvenim istraživanjima, ali i u navigaciji kao magnetomjerni kompasi. Magnetomjerni kompasi važna su kategorija geomagnetskih senzora u zrakoplovnoj navigaciji zbog kompaktnosti i male potrošnje energije u usporedbi s ostalim instrumentima [3].

U ovom diplomskom radu navedene su osnovne karakteristike magnetomjernog kompasa i posebni zahtjevi za magnetske materijale koji se koriste u njima. Princip rada detaljno je opisan za izvedbu u kojoj se elementarni osjetnik sastoji od dvije feromagnetske jezgre i tri zavojnice. Opisani su procesi koji se događaju u jednom periodu izmjenične struje za slučaj kada je vanjsko magnetsko polje jednako nuli i za slučaj kada je ono različito od nule. Da bi se stekao bolji dojam o mogućnostima magnetomjernog kompasa, opisana je i njegova usporedba s magnetskim kompasom.



## 2 Osnovni pojmovi iz magnetizma i elektromagnetske indukcije

### 2.1 Magnetsko polje

Magnetsko polje je svojstvo prostora kojim se prikazuje magnetski utjecaj na materiju. Pomoću sile koja djeluje na električni naboj određuju se svojstva prostora, uključujući i iznos i smjer magnetskog polja. Sila na električni naboj ovisi o tome gdje se on nalazi i koliko se brzo giba. Električna sila je jedna komponenta sile i ona je neovisna o gibanju naboja. Električna sila djeluje na naboj kada se on nalazi u električnom polju  $\mathbf{E}$ . Druga komponenta sile je magnetska sila, koja ovisi o brzini naboja. Izvor utjecaja magnetske sile je magnetsko polje opisano vektorom  $\mathbf{B}$ . Ukupna elektromagnetska sila na naboj je Lorentzova sila (2.1) [4].

$$\mathbf{F}_L = Q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.1)$$

Za opis magnetskog polja koristimo i vektorsku fizikalnu veličinu  $\mathbf{H}$ , koja predstavlja magnetizirajuće polje. U vakuumu su  $\mathbf{B}$  i  $\mathbf{H}$  proporcionalni, a konstanta proporcionalnosti je permeabilnost vakuuma (2.2) [5].

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (2.2)$$

Sila kojom magnetsko polje djeluje na nabijenu česticu uvijek je okomita na smjer brzine te čestice. Stoga ona ne mijenja iznos, već samo smjer brzine nabijene čestice. Magnetsko polje djeluje silom i na ravni vodič kojim prolazi struja (2.3) [6].

$$\mathbf{F} = I \mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (2.3)$$

Vodiči koji vode struju najčešće su zatvorene petlje. Sila koja djeluje na petlju iznosom je jednaka nuli zbog simetrije, ali ako petlja sa linijama magnetskog polja zatvara neki kut, na nju djeluje zakretni moment (2.4) [6].

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{m} \times \mathbf{B} \quad (2.4)$$

Vektorska fizikalna veličina  $\mathbf{m}$  je magnetski dipolni moment strujne petlje (2.5)

[5].

$$\mathbf{m} = IA \quad (2.5)$$

Zakretni moment djeluje sve dok magnetski moment strujne petlje nije paralelan s magnetskim poljem. Izraz (2.4) možemo generalizirati za slučaj zavojnice koja se sastoji od  $N$  naslaganih strujnih petlji (2.6) [6].

$$\tau = NIAB\sin\phi \quad (2.6)$$

Ponašanje zavojnice u magnetskom polju nalikuje onom štapnog magneta ili igle kompasa. Ukupni magnetski moment štapnog magneta usmjeren je od južnog pola prema sjevernom polu i rezultat je mikroskopskih magnetskih momenata. Ako je magnet pričvršćen tako da može slobodno rotirati oko svog težišta, u prisustvu magnetskog polja na njega djeluje zakretni moment i postavlja ga paralelno polju.

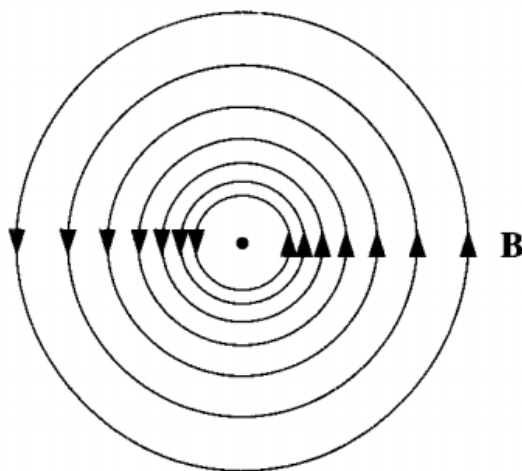
Izvori magnetskog polja su naboj u gibanju, električna struja te magnetizirani materijal, odnosno magnet. Magnetsko polje povezano je s nabijenim česticama u gibanju, pa je tako i struja, koja je usmjereno gibanje nabijenih čestica, izvor magnetskog polja. Biot-Savartov zakon daje nam magnetsko polje stalne struje za svaki oblik strujne petlje (2.8) [7].

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int \frac{d\mathbf{l}' \times \mathbf{r}'}{r'^3} \quad (2.7)$$

Za neke posebne konfiguracije, kao što je, primjerice, beskonačno dugi vodič kojim prolazi stalna struja, magnetsko polje može se izračunati pomoću Amperovog zakona, u kojem  $I_{enc}$  predstavlja struju zatvorenu Amperovom petljom (2.8) [7].

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_{enc} \quad (2.8)$$

Magnetsko polje grafički se prikazuje kontinuiranim linijama magnetskog polja. Gustoća linija magnetskog polja pokazuje jakost magnetskog polja. Što su linije magnetskog polja gušće na nekom mjestu, magnetsko polje je jače. Tangenta na liniju magnetskog polja u nekoj točki je smjer magnetskog polja u toj točki. Linije magnetskog polja oko ravnog vodiča su zatvorene kružnice u ravnini koja je okomita na smjer struje (Slika 2.1) [6].

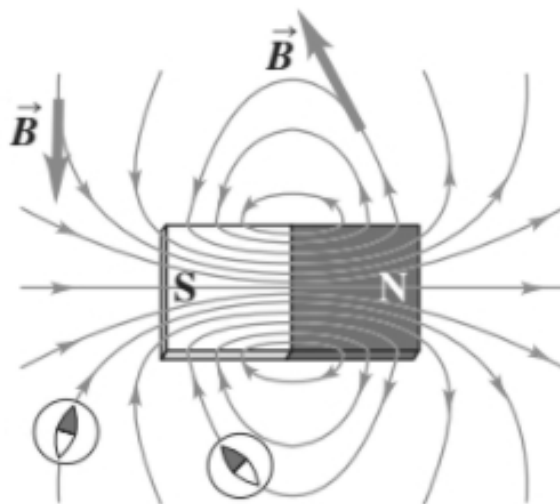


Slika 2.1: Linije magnetskog polja oko ravnog vodiča kojim prolazi struja [7]

Divergencija magnetskog polja je nula, što znači da nema magnetskih monopola, pa su linije zatvorene petlje (2.9).

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.9)$$

Magnetizam u materijalima posljedica je mikroskopskih magnetskih momenata. Orbitalno gibanje elektrona čini u klasičnoj slici mikroskopsku strujnu petlju koja ima svoj magnetski moment. Doprinos magnetskom polju dolazi i od spinskih magnetskih momenata subatomske čestice [8]. Magnetski spinski moment jezgre puno je manji od magnetskog spinskog momenta elektrona, pa ga možemo zanemariti i u obzir uzeti samo orbitalno gibanje elektrona i spin elektrona [9]. U permanentnim magnetima postoji uređenost magnetskih momenata te oni proizvode magnetsko polje oko sebe. Najpoznatiji primjer je štapni magnet. Za najčešći oblik magnetizacije štapnog magneta linije magnetskog polja su zatvorene krivulje koje izlaze iz sjevernog pola magneta i ulaze u južni pol te se zatvaraju u unutrašnjosti magneta (Slika 2.2) [6].



Slika 2.2: Linije magnetskog polja štapnog magneta [7]

## 2.2 Magnetizacija materijala

U prisustvu vanjskog magnetizirajućeg polja, u materiji se inducira magnetizacija. Magnetizacija je vektorska fizikalna veličina koja predstavlja specifični magnetski moment nekog volumena (2.10).

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{m}}{V} \quad (2.10)$$

Vanjsko magnetizirajuće polje uređuje magnetske dipole u materijalu [5]. U permanentnim magnetima su mikroskopski magnetski dipoli usmjereni i bez prisustva vanjskog polja, što je uzrokovano međudjelovanjem dipola. Magnetizacija ostalih materijala bez prisustva vanjskog polja je nula, jer su magnetski dipoli nasumično orijentirani [7].

Za niz materijala, magnetizacija je proporcionalna magnetizirajućem polju. Konstanta proporcionalnosti je magnetska susceptibilnost (2.11) [7].

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H} \quad (2.11)$$

Općenito je susceptibilnost odziv sustava na neku pobudu. Magnetska susceptibilnost nam govori koliko je materijal osjetljiv na primijenjeno magnetizirajuće polje [5]. Zbog magnetizacije materijala, magnetsko polje više nema linearnu ovisnost o magnetizirajućem polju kao u izrazu (2.2) koji vrijedi za vakuum. Magnetsko polje u materijalu ima dva doprinosa, jedan je od magnetizirajućeg polja  $\mathbf{H}$ , a drugi je od

magnetizacije materijala  $\mathbf{M}$  (2.12) [8].

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (2.12)$$

Spajanjem izraza (2.11) i (2.12) dobivamo izraz (2.13).

$$\mathbf{B} = \mu_0(1 + \chi_m)\mathbf{H} \quad (2.13)$$

Izraz u zagradi u (2.13) je relativna permeabilnost materijala (2.14).

$$\mu_r = 1 + \chi_m \quad (2.14)$$

Izraz (2.13) možemo zapisati kao (2.15), gdje je fizikalna veličina  $\mu$  permeabilnost materijala.

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (2.15)$$

Permeabilnost materijala je umnožak permeabilnosti vakuuma i relativne permeabilnosti  $\mu = \mu_0\mu_r$  [8]. Permeabilnost nam govori koliko je materijal propusan za magnetizirajuće polje [5]. Za linearne materijale permeabilnost je konstanta. Ako je permeabilnost ovisna o iznosu vanjskog magnetizirajućeg polja, materijal je nelinearan [9].

### 2.3 Klasifikacija materijala

S obzirom na orijentaciju magnetskih dipola i izraženost magnetizacije, razlikujemo dijamagnetizam, paramagnetizam, feromagnetizam, antiferomagnetizam i ferimagnetizam [5].

Dijamagnetizam je posljedica djelovanja vanjskog polja na orbitalne elektrone [9]. Prisutan je u svim atomima, a zapažamo ga u atomima u kojima nema nesparenih elektrona jer tada drugi magnetski efekti nisu prisutni. Vanjsko polje u dijamagnetima inducira elementarne dipole, koji se postavljaju antiparalelno u odnosu na njega [7]. Antiparalelno slaganje u dijamagnetima uzrok je negativne magnetske susceptibilnosti. Relativna permeabilnost dijamagneta je manja od 1 [6].

Paramagnetizam se javlja kad je spinski magnetski moment različit od nule, a to je moguće kod atoma i molekula s nesparenim elektronima. Vanjsko polje uređuje

permanentne magnetske dipole u materijalu i orijentira ih u smjeru polja gdje im je potencijalna energija minimalna [7]. Magnetska susceptibilnost paramagneta je pozitivna, a relativna permeabilnost je veća od 1 [6]. Susceptibilnost nekih dijamagneta i paramagneta prikazana je u tablici 2.1.

Dijamagnet	Susceptibilnost	Paramagnet	Susceptibilnost
Bizmut	$-1.6 \cdot 10^{-4}$	Kisik	$1.9 \cdot 10^{-6}$
Zlato	$-3.4 \cdot 10^{-5}$	Natrij	$8.5 \cdot 10^{-6}$
Srebro	$-2.4 \cdot 10^{-5}$	Aluminij	$2.1 \cdot 10^{-5}$
Bakar	$-9.7 \cdot 10^{-6}$	Volfram	$7.8 \cdot 10^{-5}$
Voda	$-9.0 \cdot 10^{-6}$	Platina	$2.8 \cdot 10^{-4}$
Ugljikov dioksid	$-1.2 \cdot 10^{-8}$	Tekući kisik (-200°C)	$3.9 \cdot 10^{-3}$
Vodik	$-2.2 \cdot 10^{-9}$	Gadolinij	$4.8 \cdot 10^{-1}$

Tablica 2.1: Susceptibilnost nekih dijamagnetskih i paramagnetskih materijala [7]

Feromagnetni su materijali u kojima su magnetski dipoli zbog međudjelovanja usmjereni međusobno paralelno u grupama. Takve grupe usmjerenih magnetskih dipola nazivamo magnetske domene. Magnetski dipolni momenti u feromagnetima su, kao i kod paramagneta, posljedica spinova nesparenih elektrona. Iako postoje magnetski momenti u domenama, feromagnetni nisu magnetizirani ako su domene nasumično orijentirane. Uključivanjem vanjskog polja pomiču se granice magnetskih domena. Magnetske domene čiji je ukupni magnetski moment paralelan polju šire se na račun ostalih. U dovoljno jakom vanjskom polju, cijeli feromagnet postaje jedna domena i magnetizacija mu postaje maksimalna. To stanje se naziva zasićenje ili saturacija. Kada se isključi vanjsko polje feromagnetni zadržavaju magnetizaciju i ostaju permanentni magneti [7].

Feromagnetni iznad određene temperature, koja se naziva Curieva temperatura, gube svoju feromagnetičnost i postaju paramagnetni. Curieva temperatura za čisto željezo iznosi 770°C [9].

Magnetizacija feromagneta puno je jača nego magnetizacija paramagneta i dijamagneta. To je zato što je relativna permeabilnost feromagneta i do 100 000 puta veća. Posljedica toga je da permanentnim magnetom možemo privući komade željeza koje je feromagnet, ali ne i komade aluminija koji je paramagnet [6]. Također, zbog velike permeabilnosti, čak i primjenom malih polja inducira se velika magnetizacija pa polje koje dolazi od samog feromagneta utječe na vanjsko polje [4].

Feromagnetski materijali nisu linearni, njihova relativna magnetska permeabil-

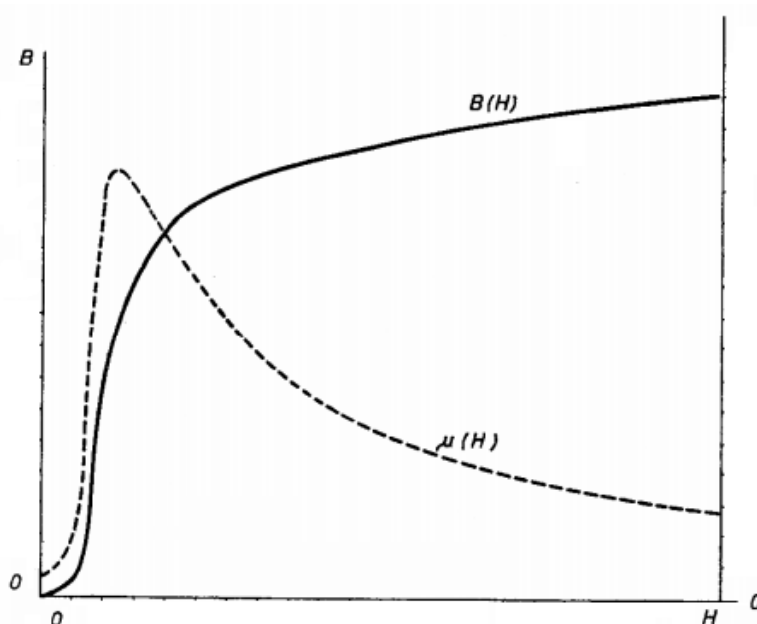
nost ovisi o vanjskom polju [9]. Na slici 2.3 prikazana su dva grafa. Graf magnetskog polja i vanjskog magnetizirajućeg polja prikazan je punom linijom te pokazuje da se magnetsko polje ne povećava linearno s vanjskim poljem. Graf s crtkanom linijom pokazuje da se povećavanjem vanjskog polja magnetska permeabilnost feromagneta smanjuje. Izraz (2.15) koji prikazuje odnos magnetskog polja i vanjskog polja možemo transformirati na dva načina. Jedan način je da podijelimo jednadžbu s  $H$ . Tako dobivena permeabilnost naziva se statička magnetska permeabilnost (2.16).

$$\mu_{stat} = \frac{B}{H} \quad (2.16)$$

Za neku točku na punoj liniji koja prikazuje magnetsko polje statička magnetska permeabilnost je omjer magnetskog polja i vanjskog polja u toj točki. Drugi pristup je da diferenciramo izraz (2.14). Tako dobivena permeabilnost naziva se dinamička magnetska permeabilnost (2.17).

$$\mu_{din} = \frac{dB}{dH} \quad (2.17)$$

Iznos dinamičke magnetske permeabilnosti je koeficijent smjera tangente na punu liniju koja prikazuje magnetsko polje. Za linearne medije, dijamagnete i paramagnete, statička i dinamička permeabilnost su identične. Za nelinearne materijale nisu identične, no kvalitativno mogu imati sličan oblik.



Slika 2.3: Krivulja magnetiziranja i magnetska permeabilnost za željezo [9]

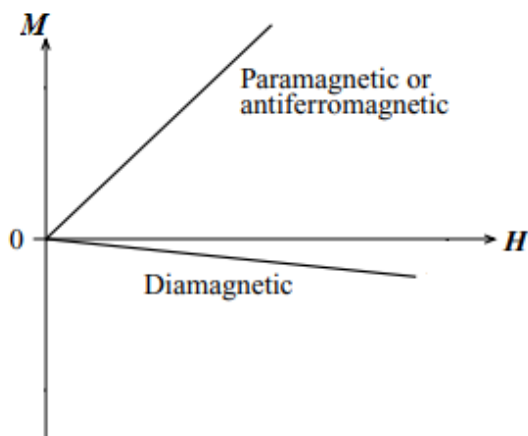
Antiferomagnetski materijali imaju dvije isprepletene magnetske podrešetke antiparalelnih magnetskih momenata. Posljedica toga je odsustvo ukupne spontane magnetizacije. U prisustvu vanjskog polja antiferomagneti se ponašaju poput paramagneta, susceptibilnost im je mala i pozitivna [5].

Ferimagnetski materijali slični su feromagnetima jer imaju spontanu magnetizaciju ispod kritične temperature. No, kao i antiferomagneti, sadrže dvije magnetske podrešetke antiparalelnih magnetskih momenata. Jedna magnetska podrešetka ima veću magnetizaciju od druge, pa zbog toga postoji ukupna spontana magnetizacija ferimagneta. Od feromagneta ih razlikuje to što su oni ionske krutine te su električni izolatori, dok su većina feromagneta metali [5].



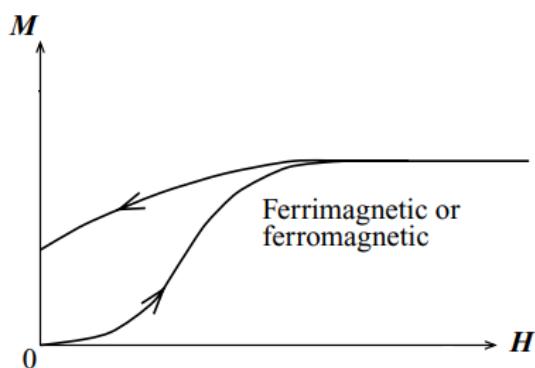
## 2.4 Magnetska histereza

Za dijamagnete, paramagnete i antiferomagnete ovisnost magnetizacije o vanjskom polju je linearna za mala polja (Slika 2.4) [5].



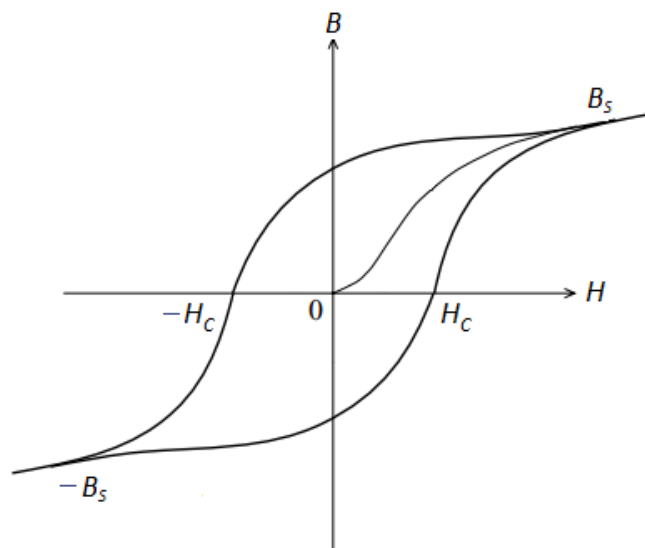
Slika 2.4: Krivulja magnetizacije za dijamagnete, paramagnete i antiferomagnete [5]

U feromagnetima i ferimagnetima, kao posljedica nelinearnosti, magnetizacija zaostaje za vanjskim poljem (Slika 2.5).



Slika 2.5: Krivulja magnetizacije za feromagnete i ferimagnete [5]

Zaostajanje u promjeni magnetizacije, odnosno ukupnog magnetskog polja, naziva se magnetska histereza [10]. Na slici 2.6 prikazana je petlja magnetske histereze za feromagnetski ili ferimagnetski materijal. Krivulja od 0 do  $B_s$  naziva se krivulja inicijalne magnetizacije. Magnetizacija je maksimalna u točki saturacije  $B_s$  te se daljnjim povećanjem vanjskog magnetizirajućeg polja ne mijenja, a magnetsko polje se nakon saturacije linearno povećava s vanjskim poljem. Isključivanjem vanjskog polja, ukupno magnetsko polje se ne vraća u nulu, nego ostaje remanentno magnetsko polje  $B_r$ . Ako želimo magnetsko polje smanjiti na nulu, moramo uključiti vanjsko polje u suprotnom smjeru od početnog. Vanjsko polje kod kojeg je ukupno magnetsko polje nula naziva se koercitivno polje i označeno je s  $-H_c$ . Daljnjim povećanjem vanjskog polja u suprotnom smjeru ponovo dolazimo do saturacije, no magnetski dipoli su sada orijentirani suprotno nego kod prve saturacije, pa je magnetsko polje  $-B_s$ . Ponavljanjem postupaka ponovo bismo došli do  $B_s$  i iscrtali petlju magnetske histereze [7]. Površina koju zatvara petlja magnetske histereze predstavlja energiju koja je tijekom ciklusa magnetiziranja prešla u toplinu [11].



Slika 2.6: Petlja magnetske histereze [5]

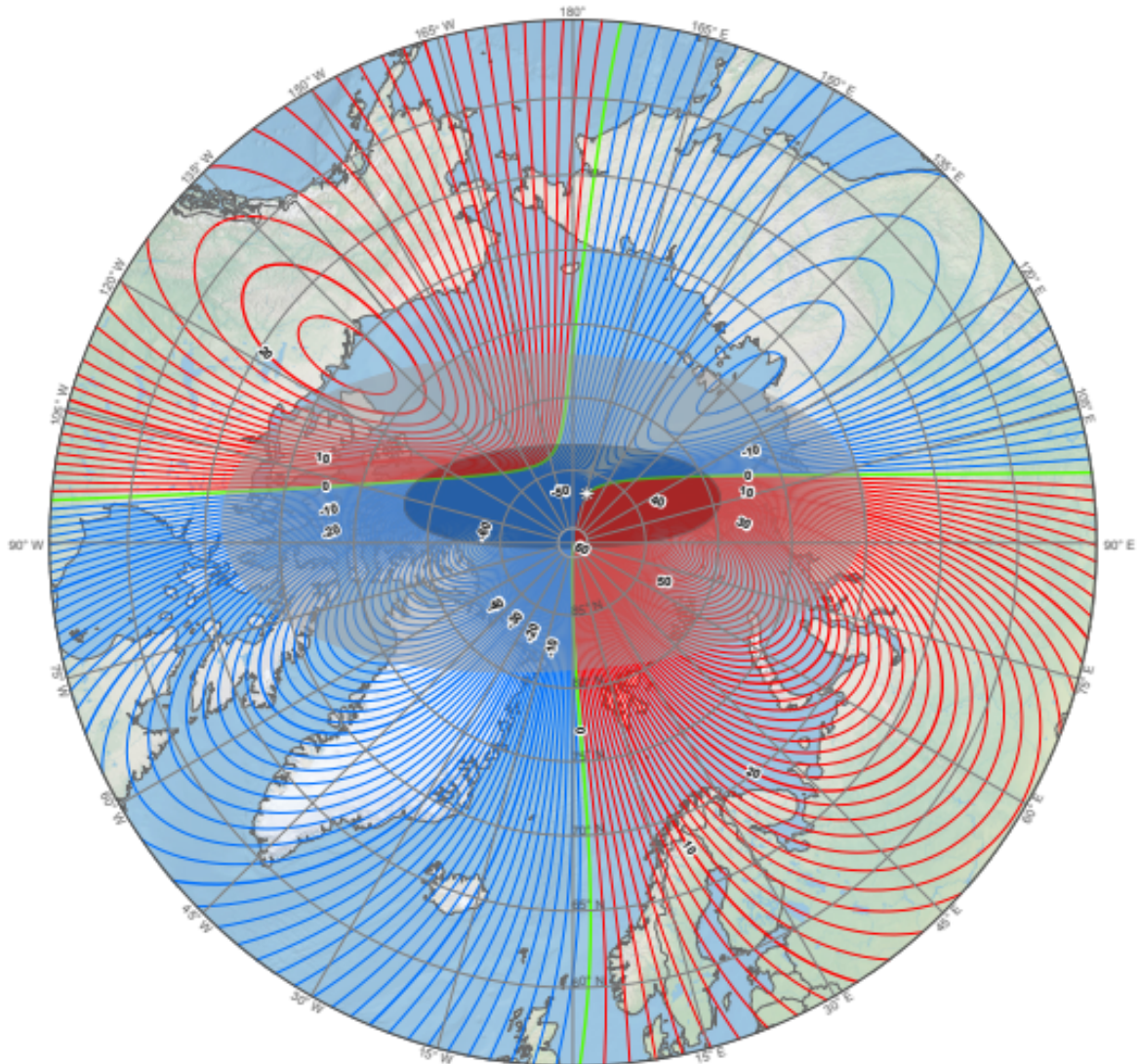
## 2.5 Magnetsko polje Zemlje

Magnetsko polje Zemlje sadrži doprinose iz jezgre, kore i plašta, te električnih struja u atmosferi. Više od 95% Zemljinog magnetskog polja dolazi od električnih struja u vanjskom dijelu tekuće jezgre i taj se doprinos naziva glavno polje. Polje kore i gornjeg plašta uzrokovano je magnetičnim stijenama i električnim strujama u Zemljinoj kori. Polje koje potječe od električnih struja u atmosferi naziva se vanjsko polje [12].

Magnetsko polje Zemlje ima složenu prostornu ovisnost, pa se često aproksimira poljem magnetskog dipola. Takvo aproksimirano polje naziva se geomagnetsko polje. Os aproksimiranog magnetskog dipola prolazi središtem Zemlje i zatvara kut od desetak stupnjeva s osi Zemljine rotacije, koji se mijenja iz godine u godinu. Presjecišta osi rotacije Zemlje s površinom Zemlje su geografski polovi te oni nisu na istim mjestima kao geomagnetski polovi [13]. Geografski polovi su važni za navigaciju jer se na njima temelji kartografija.

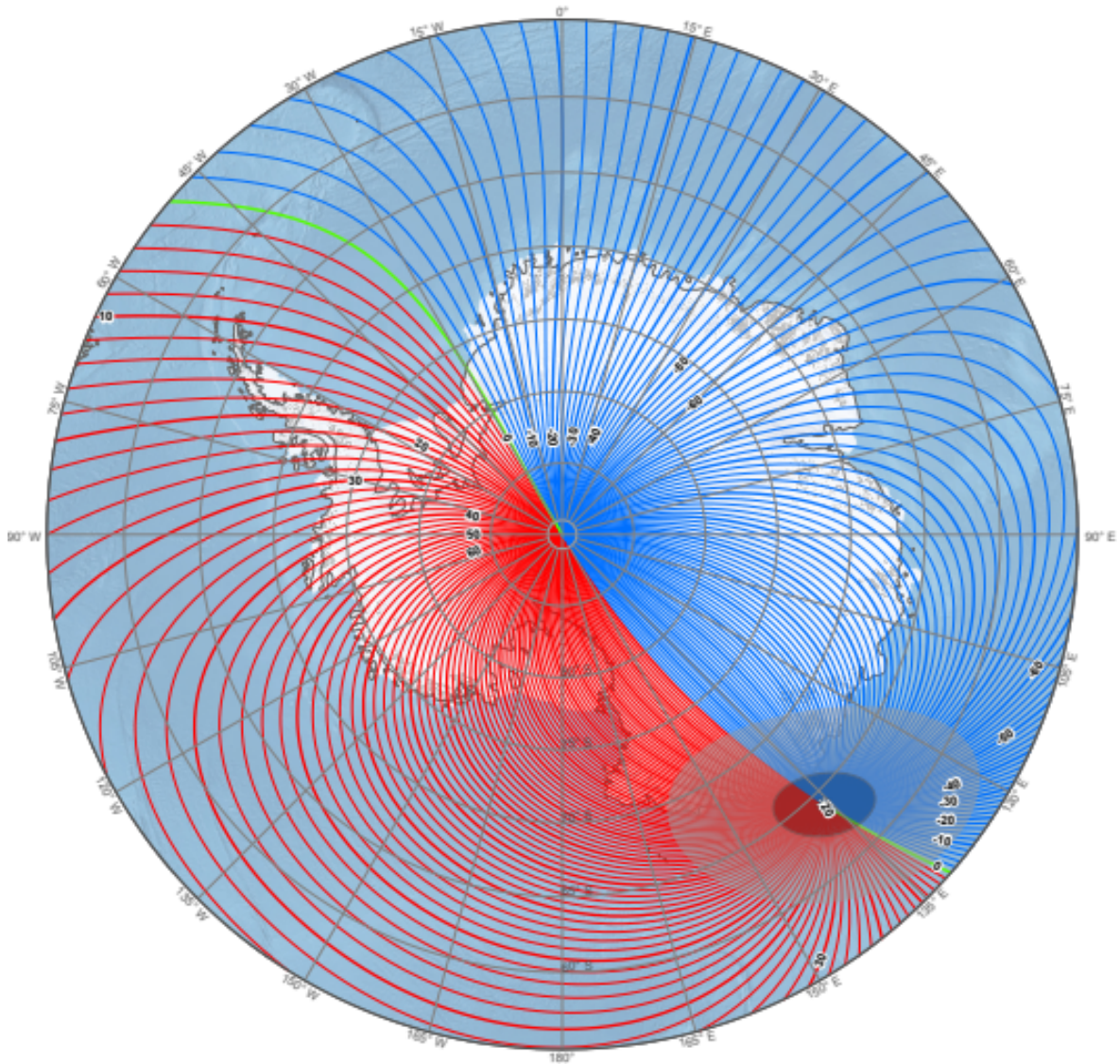
Važne veličine za opis Zemljinog magnetskog polja u nekoj točki su magnetska deklinacija i inklinacija. Magnetska deklinacija je kut između horizontalne komponente magnetskog polja i geografskog meridijana. Može biti istočna, kada je sjeverni pol magnetske igle otklonjen prema istoku od geografskog meridijana, ili zapadna, kada je sjeverni pol magnetske igle otklonjen prema zapadu [12]. Magnetska deklinacija prikazana je na slikama 2.7 i 2.8. Magnetska inklinacija je kut kojeg slobodno ovješena magnetska igla zatvara s horizontalnom ravninom. Pozitivna je kad je sjeverni kraj magnetne igle usmjeren ispod horizonta, inače je negativna [14]. Magnetska inklinacija glavnog polja u sjevernoj i južnoj polarnoj regiji prikazana je na slikama 2.9 i 2.10.

Magnetski polovi Zemlje u stvarnost nisu točke, nego kružna područja određenog radijusa [12]. U tim područjima magnetsko polje je gotovo potpuno vertikalno i inklinacija iznosi  $90^\circ$  na sjevernom magnetskom polu, odnosno  $-90^\circ$  na južnom polu. Magnetski polovi se nezavisno pomiču i ne nalaze se na točno suprotnim stranama Zemlje [15].

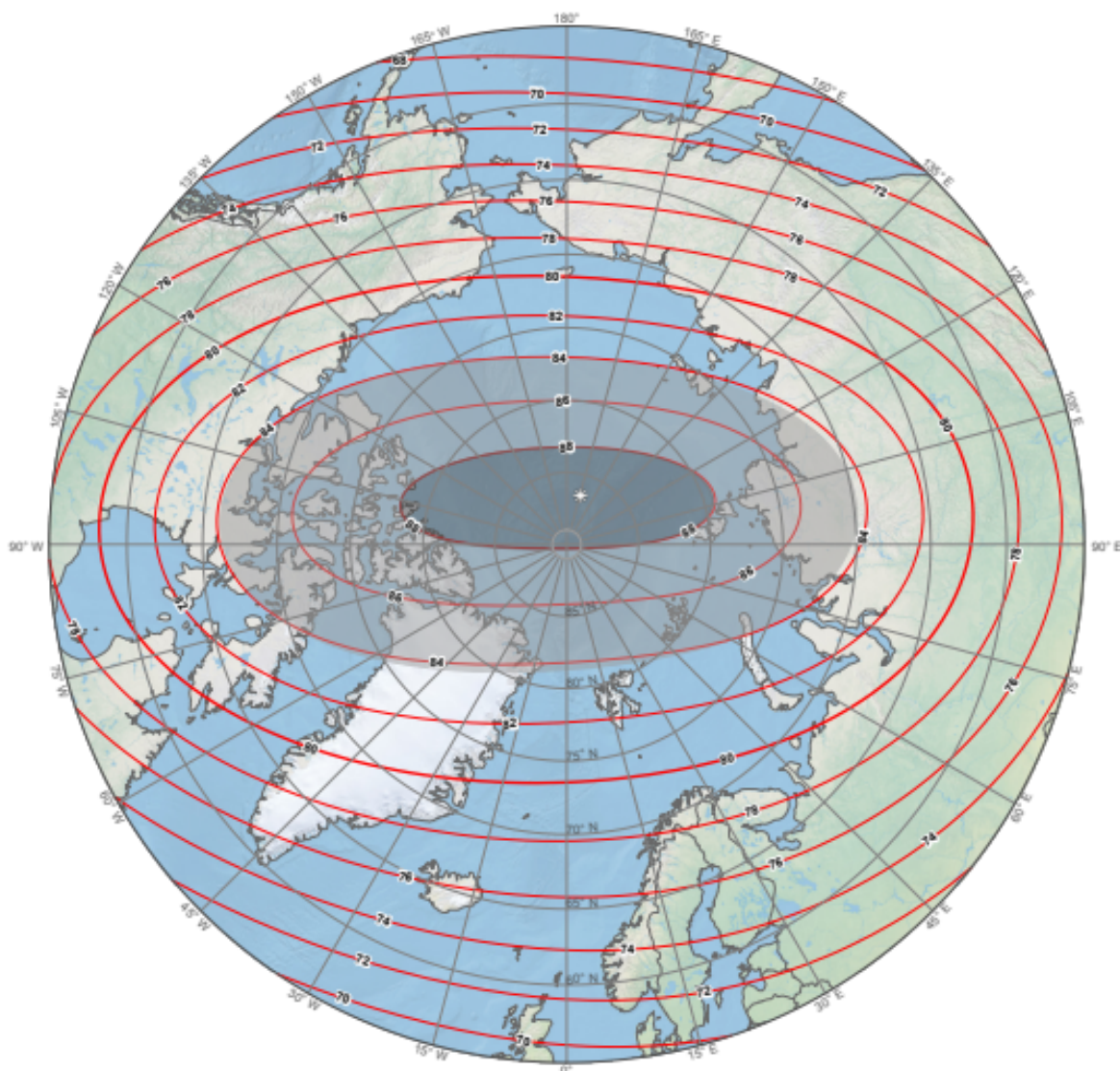


Slika 2.7: Deklinacija glavnog polja u sjevernoj polarnoj regiji. Interval kontura iznosi 2 stupnja. Crvene izogone predstavljaju pozitivnu (istočnu) deklinaciju, plave izogone predstavljaju negativnu (zapadnu) deklinaciju, a zelene linije su agone. Agone su krivulje s deklinacijom od  $0^\circ$ . Bijelom zvjezdicom označen je magnetski pol, tamno sivom površinom označena je nepouzdana zona, a svijetlo sivom zona opreza. Nepouzdana zona nalaze se oko magnetskih polova i to su područja u kojima je horizontalna komponenta magnetskog polja manja od 2000 nT te je točnost kompasa jako degradirana. Oko nepouzdatih zona nalaze se zone opreza u kojima horizontalna komponenta magnetskog polja iznosi od 2000 do 6000 nT te je točnost kompasa degradirana [16].

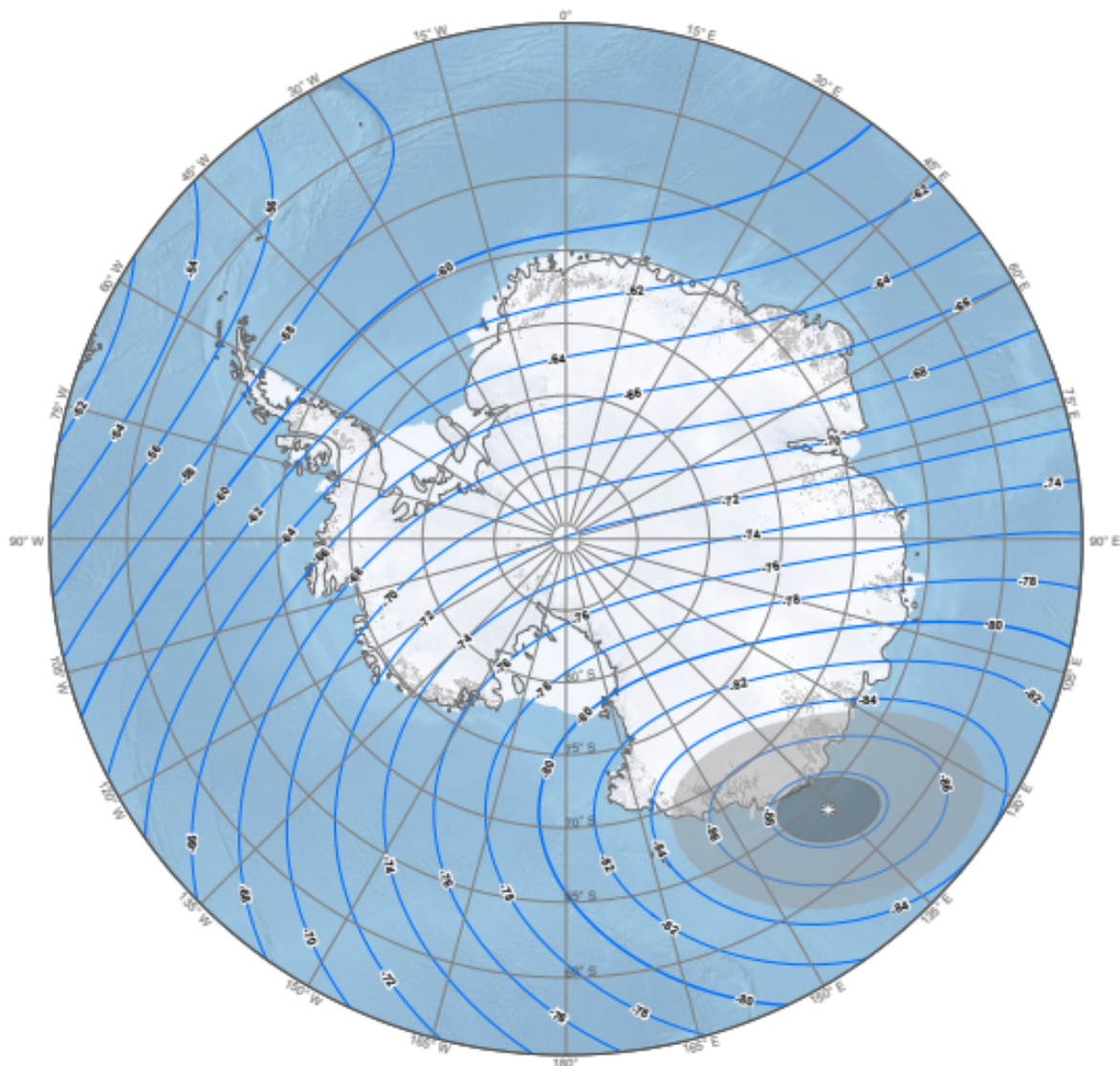




Slika 2.8: Deklinacija glavnog polja u južnoj polarnoj regiji. Interval kontura iznosi 2 stupnja. Crvene izogone predstavljaju pozitivnu (istočnu) deklinaciju, plave izogone predstavljaju negativnu (zapadnu) deklinaciju, a zelene linije su agone. Bijelom zvjezdicom označen je magnetski pol, tamno sivom površinom označena je nepouzdana zona, a svijetlo sivom zona opreza [16].



Slika 2.9: Inklinacija glavnog polja u sjevernoj polarnoj regiji. Interval kontura iznosi 2 stupnja. Crvene izokline predstavljaju pozitivnu inklinaciju, plave izokline predstavljaju negativnu inklinaciju. Bijelom zvjezdicom označen je magnetski pol, tamno sivom površinom označena je nepouzdana zona, a svijetlo sivom zona opreza [16].



Slika 2.10: Inklinacija glavnog polja u južnoj polarnoj regiji. Interval kontura iznosi 2 stupnja. Crvene izokline predstavljaju pozitivnu inklinaciju, plave izokline predstavljaju negativnu inklinaciju. Bijelom zvjezdicom označen je magnetski pol, tamno sivom površinom označena je nepouzdana zona, a svijetlo sivom zona opreza [16].



Zbog magnetskog polja Zemlje moguća je orijentacija pomoću magnetske igle koja je feromagnet te je magnetizirana duž svoje duljine. Magnetsko polje Zemlje djeluje na magnetsku iglu kompasa i usmjerava ju u ravninu sa smjerom polja tako da njen sjeverni vrh gleda prema sjevernom magnetskom polu, koji je zapravo južni magnetski pol. To znamo iz svojstva magneta da se raznoimeni polovi privlače [12].

Magnetsko polje Zemlje razmatramo kao statičko, iako to nije. Događaju se dnevne promjene zbog ionosfere te godišnje promjene zbog dinamike Zemljine jezgre. Postoje i dugoročnije promjene kojima ne znamo uzrok, ali su zabilježene i analizirane iz geoloških slojeva Zemlje. Budući da je navigacija magnetskim kompasima kratkotrajno mjerenje, tijekom trajanja očitavanja uzimamo da je magnetsko polje stalno.

Navigacijski sustavi koji koriste Zemljino magnetsko polje za orijentaciju podložni su pogreškama koje se moraju naknadno ispraviti. Varijacija, često se u izvorima naziva deklinacija, je razlika između Zemljinog magnetskog i geografskog pola [17]. Varijacija ovisi o lokaciji kompasa, ali te su promjene spore i predvidljive i lako ih je ispraviti korištenjem mapa ili grafova koji pokazuju lokalne deklinacije magnetskog polja [1]. Magnetska devijacija je kut između magnetskog meridijana i kompasnog meridijana. To je pogreška uzrokovana magnetskim materijalima od kojih je konstruirano prometalo. Magnetska devijacija kompenzira se primjenom magnetskog polja istog iznosa i suprotnog smjera [11].



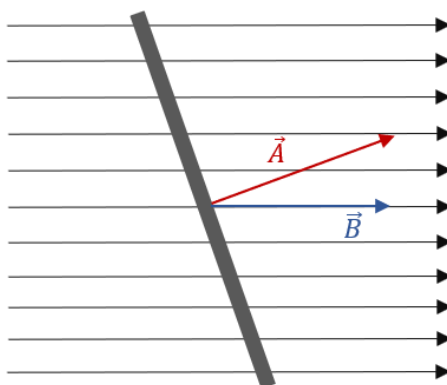
## 2.6 Elektromagnetska indukcija

Elektromagnetska indukcija je pojava da se u strujnoj petlji inducira napon zbog vremenske promjene magnetskog toka kroz površinu opisanu strujnom petljom. Magnetski tok je fizikalna veličina koja je određena skalarnim produktom magnetskog polja i površine kroz koju prolaze linije magnetskog polja (2.18) [6].

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} \quad (2.18)$$

Ako je magnetsko polje uniformno kroz ravnu površinu (Slika 2.11), izraz (2.18) se može pojednostaviti na (2.19) [6].

$$\Phi = BA \cos\phi \quad (2.19)$$



Slika 2.11: Magnetski tok

Osnovno svojstvo magnetskog polja je da tok magnetskog polja kroz zatvorenu površinu iščezava (2.19) [6].

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (2.20)$$

Faradayev zakon indukcije navodi da je inducirani napon jednak negativnoj promjeni magnetskog toka kroz petlju u vremenu (2.20). Minus u izrazu (2.20) dolazi od Lenzovog zakona i ukazuje nam da se indukcija protivi promjeni koja ju je uzrokovala. Inducirana električna struja kroz petlju stvara magnetsko polje koje se protivi promjeni toka magnetskog polja kroz tu petlju [6].

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2.21)$$

Ako postoji promjena magnetskog toka kroz zavojnicu s N zavoja, inducirani napon je N puta veći nego što bi bio za jednu petlju (2.21) [6].

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.22)$$

Faradayev zakon nam ukazuje da osim što je naboj izvor električnog polja, izvor električnog polja je i magnetsko polje koje se mijenja u vremenu (2.19) [7].

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.23)$$

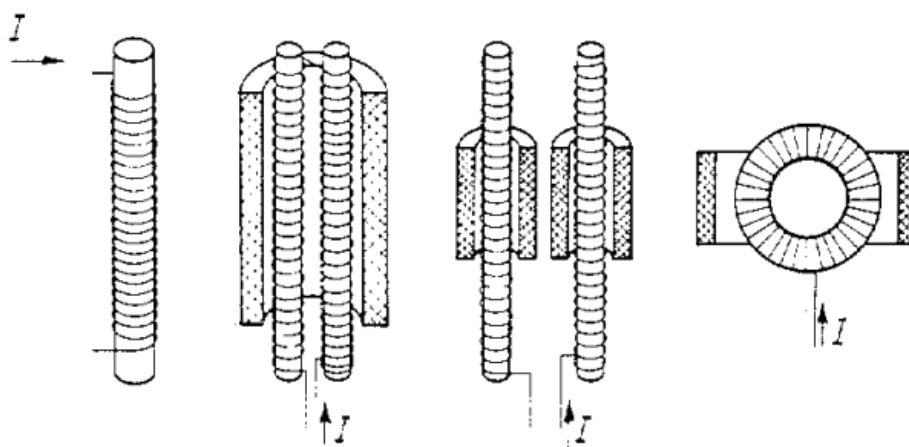
## 3 Magnetomjerni kompas

### 3.1 Osnovne karakteristike

Magnetomjerni kompas vrsta je kompasa koji određuje smjer i iznos magnetskog polja. Za rad je potrebno napajanje. Magnetomjerni kompas nema pokretnih dijelova, a elementi kompasa su često prostorno razdvojeni. Osnovni elementi su feromagnetske jezgre, napajanje i sklop za elektroničku obradu. Rad magnetomjernog kompasa temelji se na posebnom odzivu feromagnetskih materijala u vanjskim magnetskim poljima [17].

### 3.2 Opis elemenata

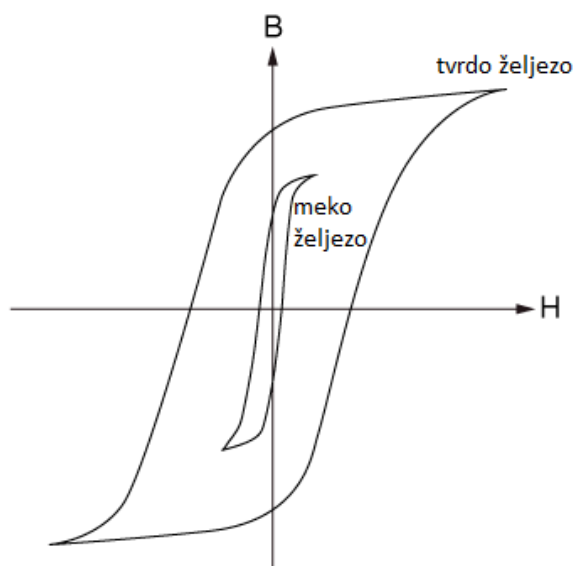
Magnetomjerni kompas može imati jednu ili više feromagnetskih jezgri. Feromagnetske jezgre mogu biti u obliku štapa s kružnim poprečnim presjekom, toroidalne ili druge složene geometrije (3.1) [18].



Slika 3.1: Različite geometrije jezgri u različitim tipovima senzora [18]

Materijali koji se koriste za izradu jezgri ovise o tipu i geometriji senzora, no postoje generalne smjernice. Jezgra mora biti pravilne geometrije te izrađena od materijala homogenog sastava i velike relativne magnetske permeabilnosti. Koercitivna sila u materijalu treba biti mala, što se odražava u uskoj petlji magnetske histereze. Na slici 3.2 prikazane su petlje magnetske histereze za meko i tvrdo željezo. Magnetostrikcija materijala također treba biti mala, jer se dimenzije jezgre ne smiju mijenjati u prisustvu vanjskog magnetskog polja [2]. Za izradu jezgri koriste se slitine željeza

koje imaju bolja magnetska svojstva od komercijalnog željeza (Tablica 3.1).



Slika 3.2: Petlje magnetske histereze za tvrdo i meko željezo

Materijal	Sastav	Inicijalna relativna magnetska permeabilnost	Gubitak energije u histerezi / $J/m^3$
Komercijalno željezo	99.95%Fe	150	270
Silicij-željezo	97% Fe 3% Si	1400	40
45 Permaloj	55% Fe 45% Ni	2500	120
Supermaloj	79% Ni 15% Fe 5% Mo 0.5% Mn	75 000	-

Tablica 3.1: Magnetski materijali [19]

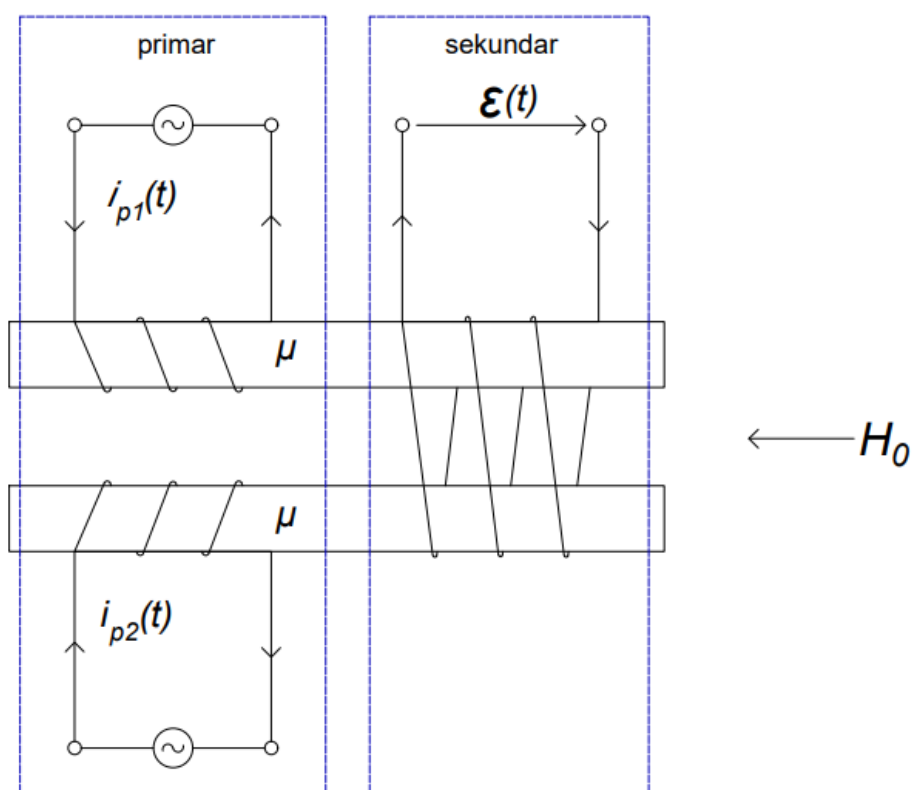
Napajanje kompasa je izmjenično i zajedno sa svim vodičima čini zatvoreni primarni strujni krug. Frekvencija napajanja može biti od 400 Hz pa sve do 100 kHz [2]. Izvedbe magnetomjernog kompasa razlikuju se po broju namotaja, naponima i strujama te nema standardiziranih podataka.

Sklop za elektroničku obradu signala sastoji se od voltmetra i elektroničkih filtara. Voltmetar prikazuje naponski impuls, ali kalibracijskim postupkom iznos napona jednoznačno je i linearno zamijenjen s iznosom vanjskog statičkog polja u prostoru u kojem se nalazi kompas. Elektronički filtri izdvajaju jednu korisnu od niza generiranih frekvencija. Sklop za elektroničku obradu signala nalazi se u sekundarnom,

nenapajanom strujnom krugu.

### 3.3 Princip rada

Princip rada bit će detaljno opisan za izvedbu u kojoj se elementarni osjetnik sastoji od dvije feromagnetske jezgre i tri zavojnice. Dvije primarne zavojnice omotane su svaka oko jedne jezgre. Treća, sekundarna zavojnica, omotana je oko obje jezgre. Primarni i sekundarni strujni krug električki su izolirani jedan od drugog. Njihova međuindukcija zrakom se zanemaruje jer je konfiguracija elemenata u prostoru takva da je dominantni efekt utjecaja primara na sekundar realiziran preko feromagnetskih jezgri. Na slici 3.3 prikazana je skica elementarnog osjetnika. Vanjsko magnetizirajuće polje pojačava magnetsko polje u donjoj jezgri, jer je u tom trenutku smjer struje napajanja u toj zavojnici takav da daje polje koje je istog smjera kao i vanjsko polje  $H_0$ .



Slika 3.3: Skica elementarnog osjetnika

Smjer vanjskog polja  $H_0$  u ovoj izvedbi mjeri se pomoću više elementarnih osjetnika postavljenih u određeni međusobni raspored [17]. Na primjeru ovakve konfiguracije razmotrit ćemo princip rada kroz dva slučaja: kada se sklop nalazi u prostoru bez vanjskog polja ( $H_0=0$ ) te kada se nalazi u statičkom vanjskom polju ( $H_0\neq 0$ ) kojem je smjer paralelan osi simetrije zavojnica.

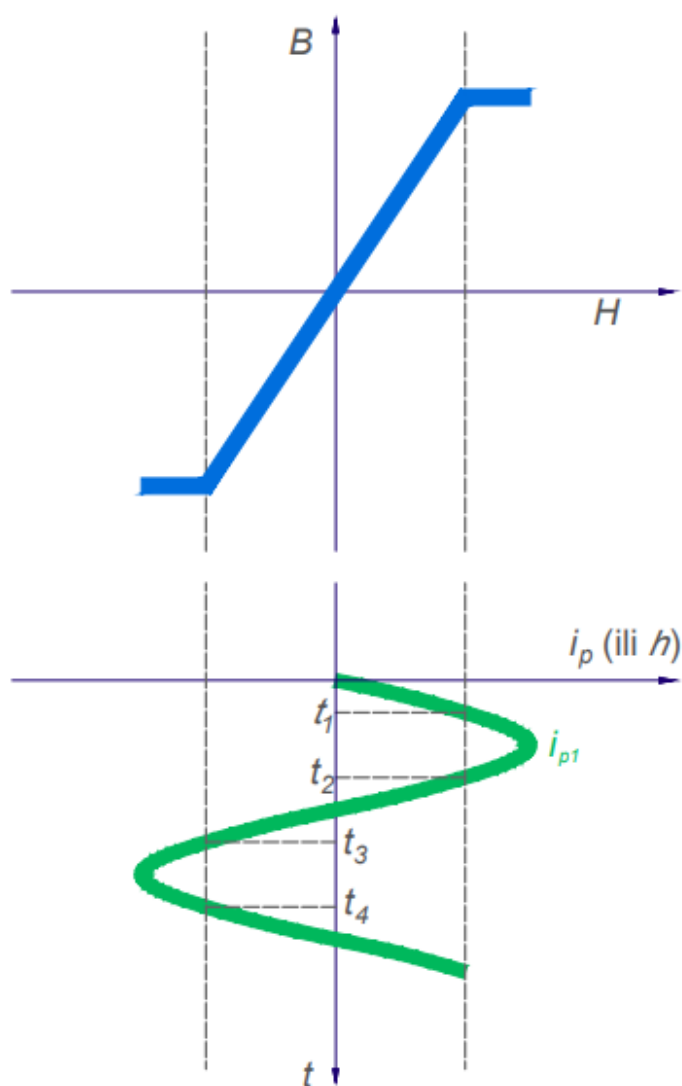
Primarne zavojnice napajane su izmjeničnim monofrekventnim strujama. Izvori kojima se napajaju primarne zavojnice jednake su frekvencije i amplitude. Iz izmjenične struje svake primarne zavojnice razvija se izmjenično magnetizirajuće polje koje magnetizira feromagnetsku jezgru unutar zavojnice. Amplituda izmjeničnih struja primarnih zavojnica omeđena je uvjetom da feromagnetske jezgre moraju biti saturirane poljem te zavojnice.

Uz magnetizaciju feromagnetskih jezgri, bitan proces je i elektromagnetska indukcija koja se događa u sekundaru. Površina sekundarne zavojnice je stalna, ali se zbog periodičkih promjena magnetizirajućeg polja mijenja magnetski tok kroz nju. Zbog promjene magnetskog toka kroz jezgre, u sekundarnoj zavojnici se inducira napon. Postoje dva istovremena doprinosa promjeni magnetskog toka, pa ispada kao da se napon sastoji od dva doprinosa.

### 3.4 Opis procesa

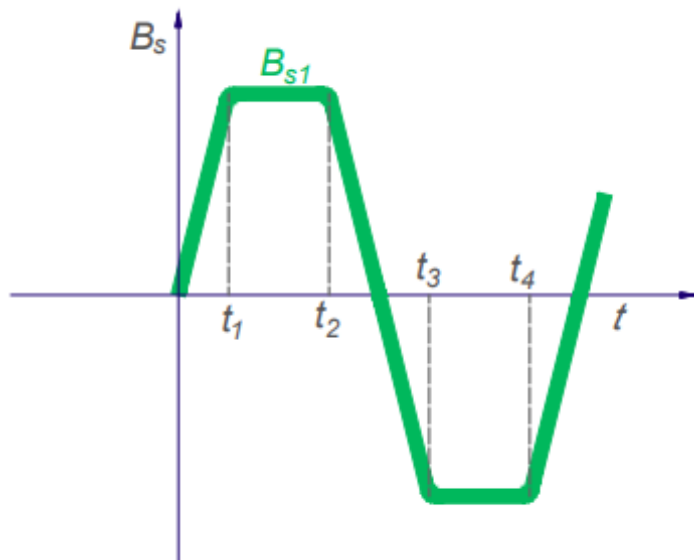
Razmotrimo prvo slučaj kada je statičko vanjsko polje jednako nuli ( $H_0=0$ ). Na slikama 3.4, 3.5, 3.6 prikazani su dijagrami vezanih veličina za jednu primarnu zavojnicu s feromagnetskom jezgrom.

Na slici 3.4 prikazani su  $B-H$  i  $i-t$  dijagrami. Petlja histereze na dijagramu  $B-H$  je uska petlja za materijale od kojih se izrađuje jezgra te ju možemo prikazati kao izlomljenu dužinu. Dijagram  $i-t$  prikazuje struju (magnetizirajuće polje) primarne zavojnice u ovisnosti o vremenu. To magnetizirajuće polje magnetizira jezgru. Pri dovoljno velikoj amplitudi primarne struje, feromagnetska jezgra ulazi u područje zasićenja.



Slika 3.4:  $B-H$  i  $i-t$  dijagrami

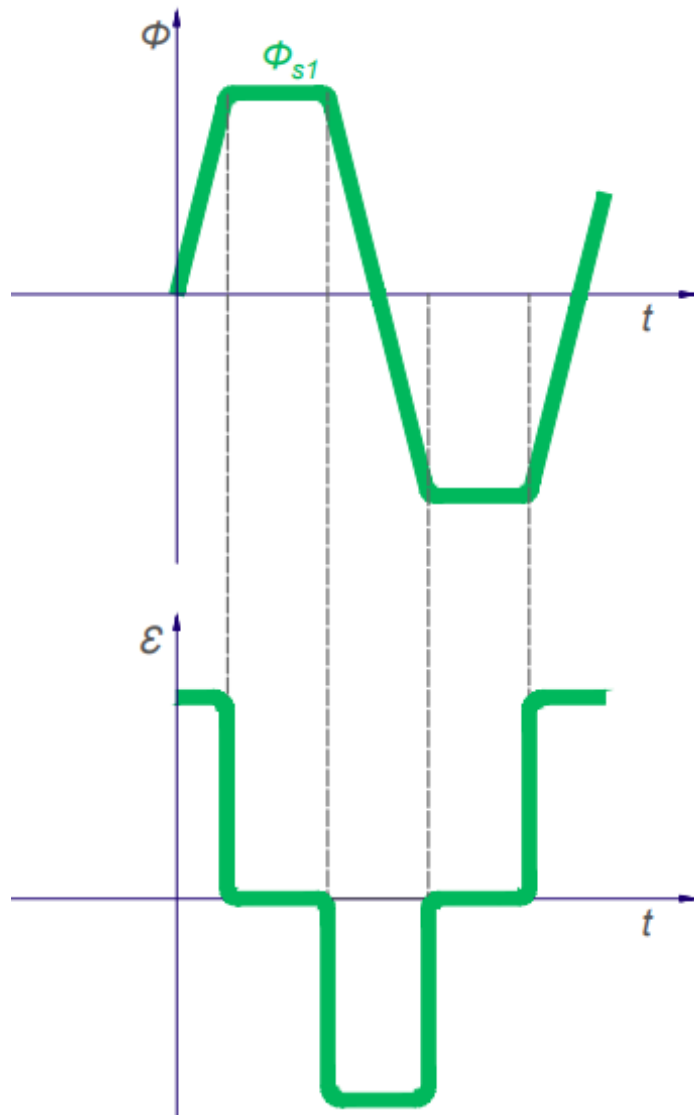
Na  $B_s$ - $t$  dijagramu na slici 3.5 prikazano je ukupno magnetsko polje koje djeluje na sekundarnu zavojnicu u vremenu. Sinusoidalna ovisnost pojednostavljena je trapeznim oblikom, bez smanjenja općenitosti.



Slika 3.5:  $B_s$ - $t$  dijagram

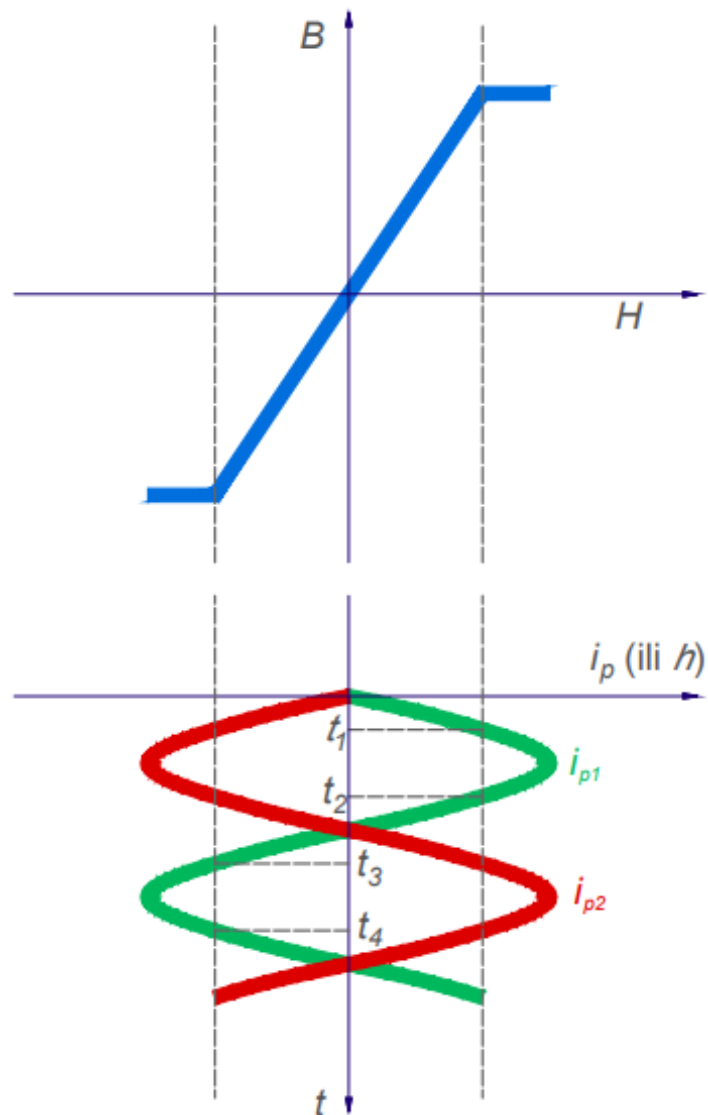


Na slici 3.6 prikazani su  $\phi$ - $t$  i  $\varepsilon$ - $t$  dijagrami. Zbog promjene magnetskog polja, magnetski tok u sekundarnoj zavojnici se mijenja u vremenu. Zbog promjene magnetskog toka u vremenu, u sekundarnoj zavojnici se inducira napon. U području saturacije jezgre promjena magnetskog toka je zanemariva i u tim slučajevima je napon nula. To se događa dva puta tijekom jednog perioda. Konfiguracija zavojnice i voltmetra je takva da mjeri pozitivan napon kada tok raste.

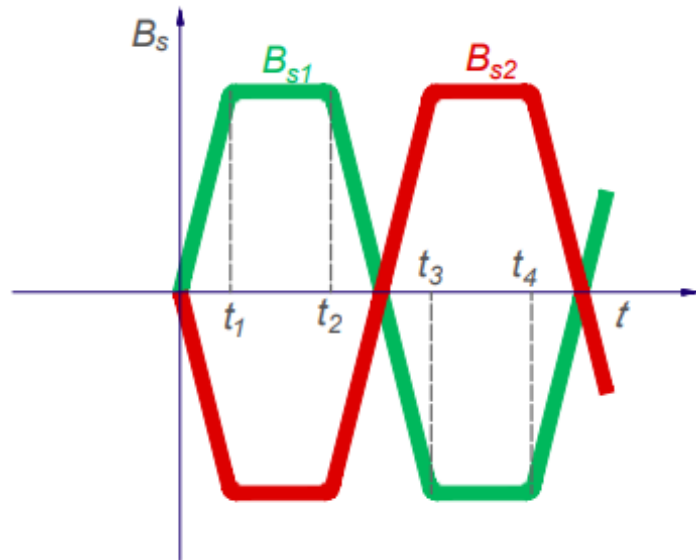


Slika 3.6:  $\phi$ - $t$  i  $\varepsilon$ - $t$  dijagrami

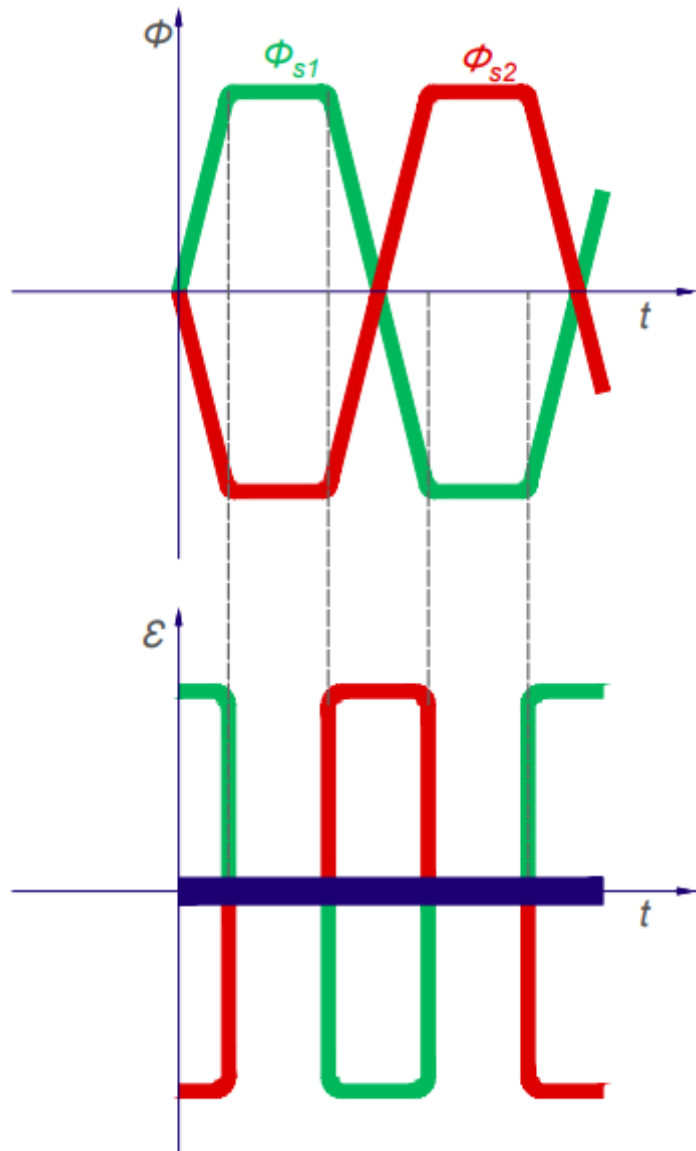
Prethodno opisani procesi događaju se u obje zavojnice istovremeno, no u drugoj zavojnici taj proces ima suprotan predznak. Na slikama 3.7, 3.8 i 3.9 prikazani su dijagrami vezanih veličina za obje zavojnice s feromagnetskim jezgrama. Zelene krivulje prikazuju veličine od jedne primarne zavojnice, a crvene od druge primarne zavojnice. Zbog diferencijalne konfiguracije i napajanja primarnih zavojnica s identičnim izmjeničnim strujama, inducirani naponi u sekundaru se poništavaju. Poništavanje napona prikazano je plavom linijom na  $\varepsilon$ - $t$  dijagramu na slici 3.9.



Slika 3.7:  $B$ - $H$  i  $i$ - $t$  dijagram



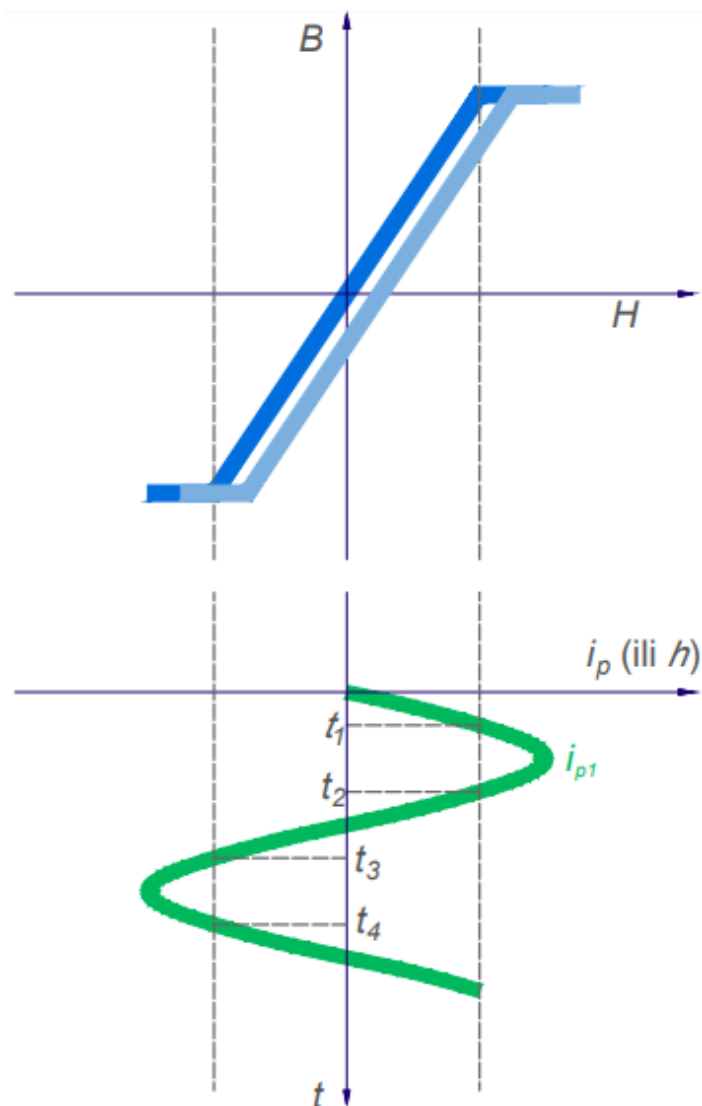
Slika 3.8:  $B_s$ - $t$  dijagram



Slika 3.9:  $\phi$ - $t$  i  $\epsilon$ - $t$  dijagram

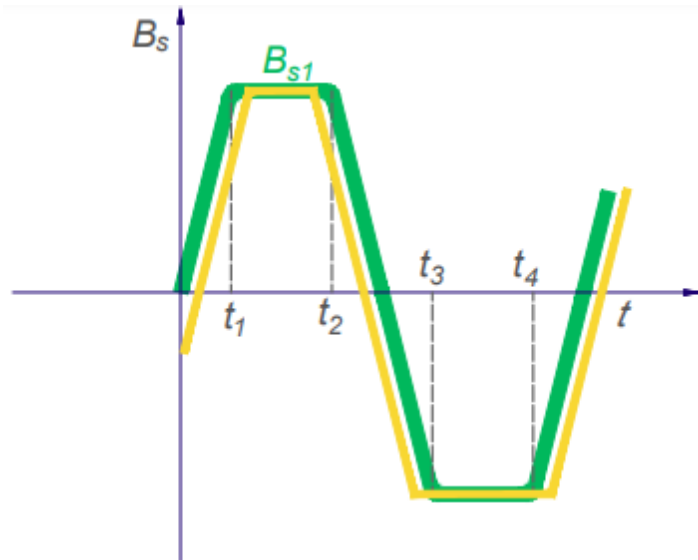
Preostaje nam razmotriti slučaj kada je statičko vanjsko polje različito od nule ( $H_0 \neq 0$ ) i paralelno s osima feromagnetskih jezgri. Na slikama 3.10, 3.11, 3.12 prikazani su dijagrami vezanih veličina za jednu primarnu zavojnicu s feromagnetskom jezgrom.

Na slici 3.10 prikazani su  $B-H$  i  $i-t$  dijagram. Petlja histereze prikazana svjetlijom bojom na dijagramu  $B-H$  odnosi se na slučaj kada je vanjsko magnetizirajuće polje različito od nule i ne prolazi kroz ishodište. Dijagram  $i-t$  prikazuje struju (magnetsko polje) primarne zavojnice u ovisnosti o vremenu. Zbog prisustva statičkog vanjskog polja, feromagnetske jezgre ne postižu saturaciju u isto vrijeme.



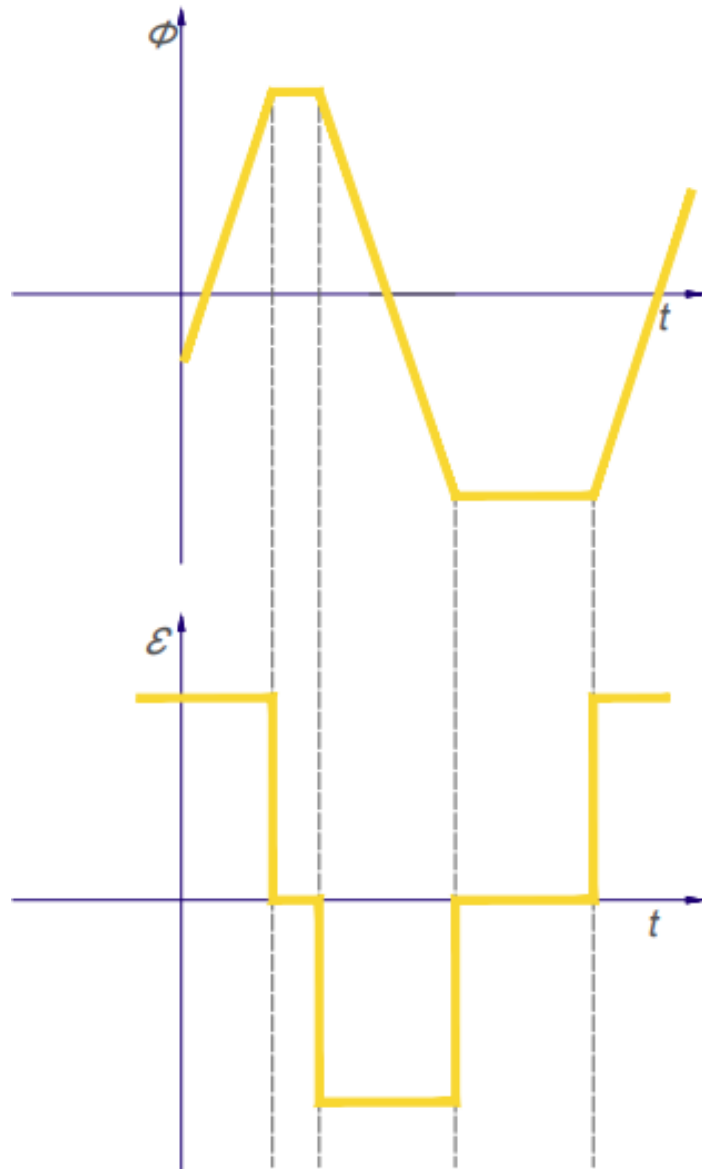
Slika 3.10:  $B-H$  i  $i-t$  dijagram

Na  $B_s$ - $t$  dijagramu žutom krivuljom je prikazao ukupno magnetsko polje koje djeluje na sekundarnu zavojnicu u vremenu i ono predstavlja modifikaciju zelene krivulje. Zbog prisustva statičkog vanjskog polja, u jednom dijelu perioda ukupno magnetsko polje je oslabljeno, a u drugom pojačano.



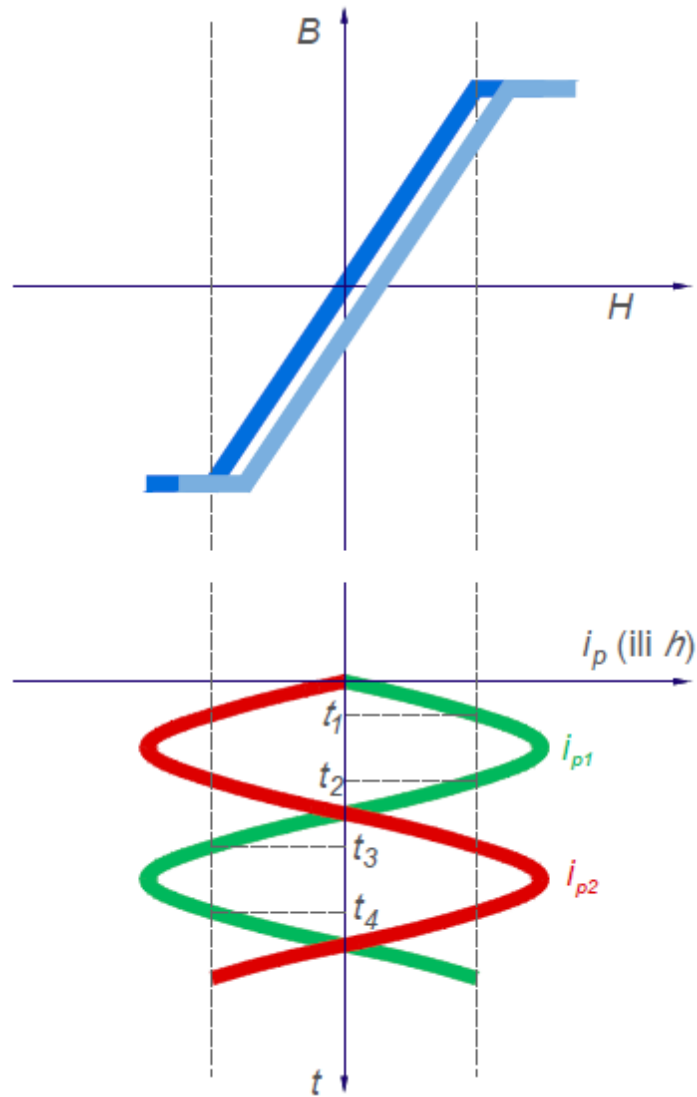
Slika 3.11:  $B_s$ - $t$  dijagram

Na slici 3.12 prikazani su  $\phi$ - $t$  i  $\varepsilon$ - $t$  dijagram. Promjena magnetskog toka u vremenu proporcionalna je promjeni magnetskog polja. Zbog promjene magnetskog toka u vremenu, u sekundarnoj zavojnici se inducira napon, koji je i u ovom slučaju dva puta tijekom perioda jednak nuli.

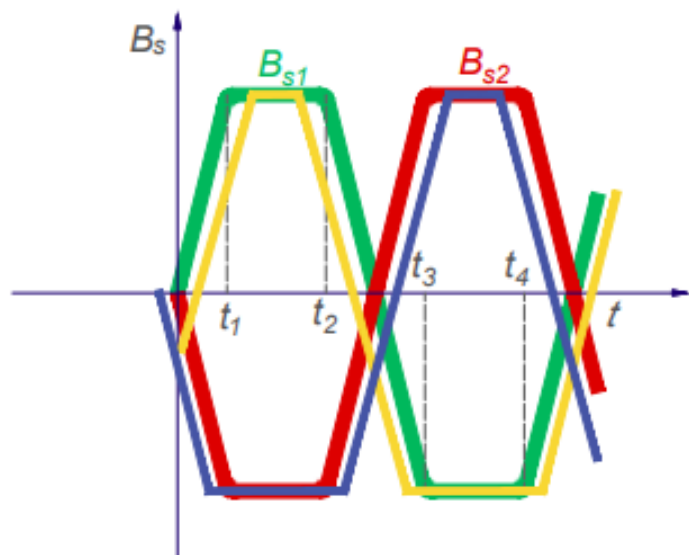


Slika 3.12:  $\phi$ - $t$  i  $\varepsilon$ - $t$  dijagram

Na slikama 3.13, 3.14 i 3.15 prikazani su dijagrami vezanih veličina za obje zavojnice s feromagnetskim jezgrama u prisustvu statičkog vanjskog polja. Zelenom i crvenom bojom prikazane su veličine koje se odnose na slučaj  $H_0=0$  (ili su iste kao i u tom slučaju), a žutom i plavom bojom prikazane su veličine koje se odnose na slučaj  $H_0 \neq 0$  i one predstavljaju modifikaciju zelene i crvene boje.



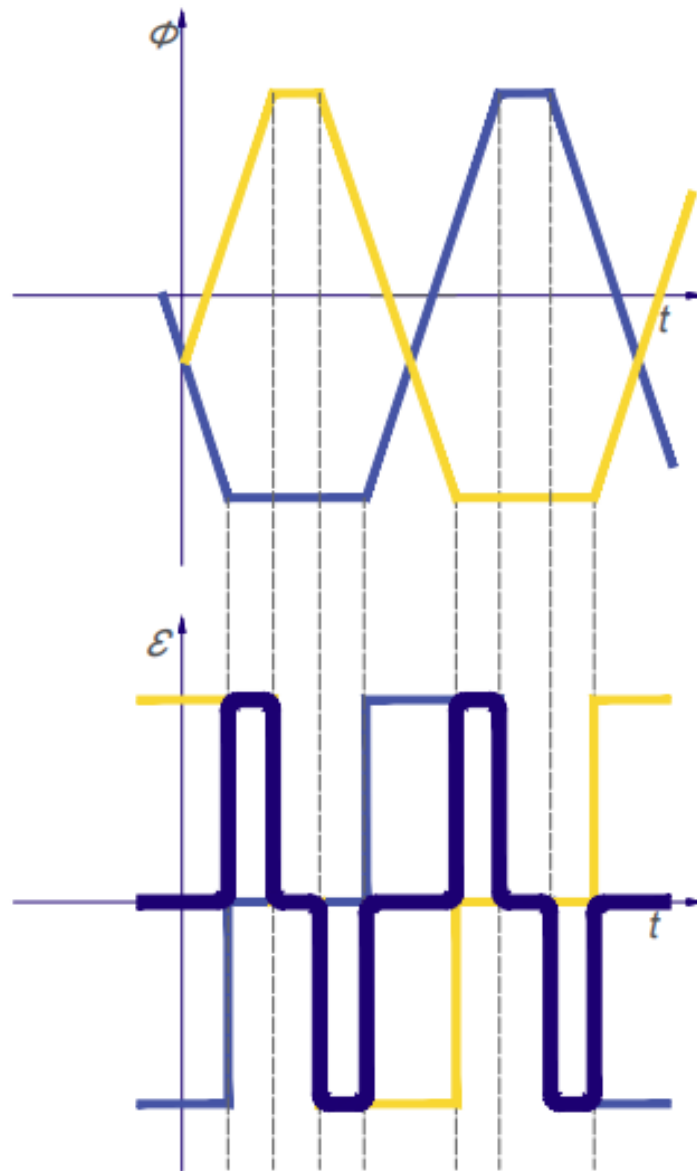
Slika 3.13:  $B$ - $H$  i  $i$ - $t$  dijagram



Slika 3.14:  $B_s$ - $t$  dijagram



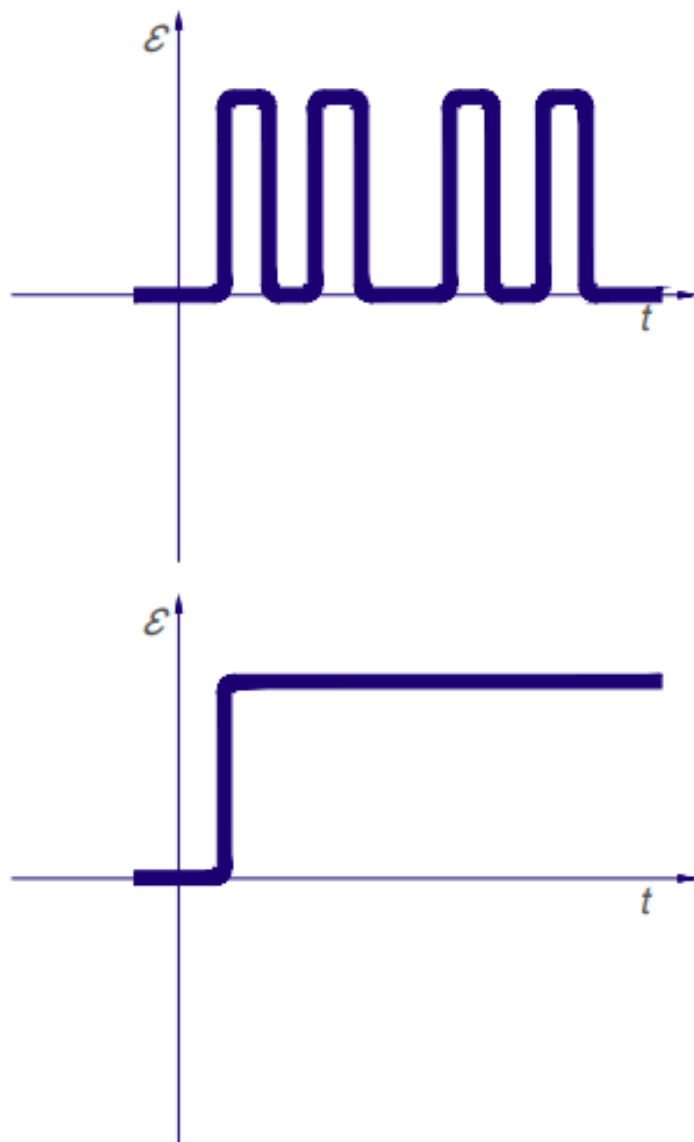
Na slici 3.15 možemo uočiti da je frekvencija napona sekundara dvostruka frekvencija napajanja primarnih zavojnica. Saturirana feromagnetska jezgra je udvajatelj frekvencije jer je inducirana struja koja prolazi sekundarnom zavojnicom dvostruke frekvencije u odnosu na frekvencije struja primarnih zavojnica.



Slika 3.15:  $\phi$ - $t$  i  $\epsilon$ - $t$  dijagrami

Naponski signal koji dolazi sa sekundara prolazi kroz punovalni ispravljač koji propušta pozitivni dio izlaznog napona i invertirani dio negativnog izlaznog napona (Slika 3.16). Na prvom  $\varepsilon-t$  dijagramu na slici 3.16 uočavamo da stupci napona nisu ekvidistantni. Iz toga možemo zaključiti da je to periodička funkcija s ogromnim brojem viših harmonika, različitih frekvencija u odnosu na pobudnu frekvenciju. Na drugom dijagramu prikazana je amplituda signala na frekvenciji jednakoj dvostrukoj frekvenciji pobudne, primarne struje.

Sa stajališta mjeriteljstva periodičkih pojava prikladno je mjeriti signal na frekvenciji različitoj od frekvencije pobude, jer se time isključuju utjecaji niza pasivnih elemenata, veznih i parazitnih kapaciteta i induktiviteta koji bi doprinosili pogrešci mjerenja signala na frekvenciji jednakoj frekvenciji napajanja. Signal se ispravlja i filtrima se eliminiraju sve frekvencije različite od dvostruke frekvencije napajanja, jer je iznos vanjskog polja jednoznačno povezan s tom frekvencijom [17].



Slika 3.16: Signal nakon prolaska kroz filtre i amplituda signala na dvostrukoj frekvenciji u odnosu na pobudu

## 4 Odnos magnetomjernog kompasa i magnetskog kompasa

### 4.1 Osnovne karakteristike magnetskog kompasa

Magnetski kompas je navigacijski instrument koji pokazuje gdje se nalazi Zemljin magnetski sjever. Ako je kompas učvršćen za brod ili drugo prometalo, odklon kazaljke pokazuje kut između smjera kretanja i smjera sjevernog magnetskog pola. Kod magnetskog kompasa osjetnik je magnetizirana igla koja se može rotirati oko vertikalne osi. Magnetska igla se rotira u magnetskom polju zbog djelovanja zakretnog momenta, koji ju postavlja paralelno s magnetskim poljem (2.4) [17]. U ovom radu magnetski kompas razmatra se kako bi karakteristike magnetomjernog kompasa bile jasnije, a one su većinom prednosti u odnosu na magnetski kompas.



Slika 4.17: Magnetski kompas [17]

### 4.2 Elementi magnetskog kompasa

Elemente magnetskog kompasa opisat ćemo za kompas s ružom koji je najzastupljeniji magnetski kompas. Elementi kompasa s ružom su ruža, magneti, ležaj, plovak i tekućina. Magneti su štapni magneti, pričvršćeni za ružu s donje strane ili unutar nje. Ako osi magneta nisu paralelne s magnetskim poljem Zemlje, javlja se zakretni moment koji uzrokuje rotaciju ruže i magneta oko osi kompasa. Ruža i kućište ve-

zani su ležajevima. Ležajevi se izrađuju od tvrdog materijala kojim se minimizira kontaktna sila trenja i trošenje. Tekućina služi za prigušivanje oscilacija ruže, za povećanje uzgona i smanjivanje opterećenja ležaja. Tekućina je viskozna smjesa kerozina i mineralnog ulja. Zakrivljeno staklo na kućištu kompasa i tekućina djeluje zajedno kao povećalo oznaka na ruži. Plovak povećava uzgon i dodatno smanjuje ukupno opterećenje nosača [17].

Kod korištenja magnetskog kompasa u zrakoplovnoj i brodskoj navigaciji, zbog magnetske deklinacije se neposredno u blizini kompasa postavlja tablica s korekcijom kuta [17]. Dijelovi zrakoplova i brodova načinjeni su od magnetskih materijala te se u prisustvu magnetskog polja u njima inducira magnetizacija. Magnetsko polje koje dolazi od magnetiziranih dijelova zrakoplova i broda kompenzira se magnetskim poljem istog iznosa i suprotnog smjera [11].

### ***4.3 Usporedba magnetskog i magnetomjernog kompasa***

Magnetski i magnetomjerni kompas osjetljivi su na iznos komponente magnetskog polja Zemlje u određenom smjeru. Najizraženija razlika između ta dva kompasa je upravo ta da magnetomjerni kompas, uz smjer, mjeri i iznos magnetskog polja. Konstrukcija magnetomjernog kompasa znatno je složenija od one kod magnetskog kompasa, pa je i održavanje složenije. Magnetomjerni kompas može imati više elementarnih osjetnika, koji su sastavljeni od feromagnetskih jezgri i zavojnica. Ostali elementi magnetomjernog kompasa mogu biti prostorno razdvojeni. Magnetomjerni kompas prirodno generira naponski izlazni impuls kojeg je relativno lako prenositi na udaljene lokacije i ne treba ga prije prijenosa dodatno pretvarati u druge vrste signala. Nedostatak magnetomjernog kompasa je to što mu je za rad potrebno napajanje [17]. Jedan od glavnih problema magnetomjernog kompasa je kompenzacija različitih magnetskih efekata. Ako je magnetomjerni kompas integriran s drugim referentnim orijentacijskim sustavom kao što je globalni satelitski navigacijski sustav (GPS, GLONASS ili GALILEO), referentni sustav može identificirati i eliminirati magnetsku devijaciju zbog utjecaja iz okoline. To nije uvijek moguće rješenje, pogotovo u sustavima u kojima je važna ekonomičnost, pa je eliminacija magnetske devijacije još uvijek izazov [1].

Magnetski kompas, za razliku od magnetomjernog, ima pokretnih dijelova. Kod magnetskog kompasa osjetnik je ruža s magnetima koja se zakreće pod utjecajem magnetskog polja. Magnetski kompas je instrument koji je u cijelosti smješten u svoje kućište. Na većim visinama i većim geografskim širinama smanjena mu je osjetljivost. Povećanjem zahtjeva u navigaciji do izražaja su došle manjkavosti magnetskog kompasa. Iako je trenje između pokretnih dijelova magnetskog kompasa smanjeno tekućinom u kojoj se oni nalaze, nemoguće ga je u potpunosti eliminirati. Magnetomjerni kompas nema pokretnih dijelova pa nagle promjene brzine i smjera prilikom kretanja ne utječu na točnost mjerenja. Magnetomjerni kompas pouzdaniji je i na većim visinama, a pogodno je i to što mu dijelovi mogu biti prostorno razdvojeni, pa osjetnik može biti smješten daleko od izvora magnetskog polja u prometalu [17].

## 5 Zaključak

Magnetomjerni kompas primjer je primijenjene fizike. Rad ovog kompasa temelji se na nelinearnosti magnetizacije feromagnetskih materijala, čija magnetska permeabilnost ovisi o vanjskom polju. U magnetomjernom kompasu nalazi se jedna ili više feromagnetskih jezgri. One mogu biti različitih geometrija, no najčešće izvedbe magnetomjernog kompasa su one s dvije feromagnetske jezgre postavljene paralelno vanjskom polju i izvedba s toroidalnom feromagnetskom jezgrom. Za izradu feromagnetskih jezgri koriste se slitine željeza zbog boljih magnetskih svojstava. Slitina nikla i željeza ima veću magnetsku permeabilnost od komercijalnog željeza, dok su gubici energije prilikom histereze mali.

Prednost magnetomjernog kompasa je to što je višestruko osjetljiviji od drugih senzora magnetskog polja te ne registrira samo promjene polja, nego i mjeri apsolutno polje. Magnetomjerni kompas nema rotirajućih dijelova pa je manje osjetljiv na vibracije i nagle promjene brzine i smjera [2]. Nedostatak magnetomjernog kompasa je njegova složena konstrukcija i održavanje te potreba za napajanjem [17].

Elektronički kompasi, kao što je magnetomjerni kompas, važan su dodatak globalnim satelitskim navigacijskim sustavima u visokokvalitetnim navigacijskim sustavima. Magnetomjerni kompas je glavni navigacijski instrument u manjim prometima konstruiranim od neferomagnetskih materijala [1]. Daljnjim razvojem i proučavanjem magnetskih materijala, magnetomjerni kompas može postati još kompaktniji, ekonomičniji i precizniji.

## 6 Metodički dio

### 6.1 Uvod

Danski fizičar H. C. Oersted 1820. godine otkrio je vezu između električne struje i magnetizma. Uočio je da se magnetska igla kompasa zakreće u blizini vodiča kojim prolazi struja. Time je pokazao da magnetsko polje ne postoji samo oko magneta, nego i oko vodiča kojim prolazi struja. Oerstedov pokus često se naziva najvažnijim pokusom ikada. To otkriće, uz ostala otkrića povezanosti električnih i magnetskih pojava, rezultiralo je mnoštvom izuma koji su neizostavan dio naše svakodnevice [20].

Magnetsko polje grafički se prikazuje linijama magnetskog polja. One su uvijek zatvorene linije, izlaze iz sjevernog pola magneta, ulaze u južni te se spajaju unutar magneta. U odabranoj točki linije magnetskog polja vektor magnetskog polja leži na tangenti koja prolazi tom točkom. Smjer magnetskog polja oko ravnog vodiča kojim prolazi struja možemo odrediti pravilom desne ruke. Linije polja oko ravnog vodiča su koncentrične kružnice. Ako palac desne ruke pokazuje smjer struje, savijeni prsti nam pokazuju smjer magnetskog polja. Smjer magnetskog polja strujne petlje i zavojnice također se može odrediti pravilom desne ruke, no u ovom slučaju savijeni prsti pokazuju smjer struje kroz petlju ili zavojnicu, a ispruženi palac pokazuje smjer magnetskog polja. Kada zavojnicom teče struja, unutar nje nastaje homogeno magnetsko polje. Zavojnica kojom prolazi struja ima svojstva magneta i nazivamo ju elektromagnet. Magnetsko polje elektromagneta može se značajno pojačati dodavanjem jezgre načinjene od materijala velike relativne magnetske permeabilnosti [20]. Najčešća primjena elektromagneta je za nastanak upravljane privlačne sile koja se koristi za dizanje i premještanje željeznih predmeta u različitim elektrostrojarskim konstrukcijama. Važna primjena elektromagneta je stvaranje jakih magnetskih polja potrebnih za elektromehaničku pretvorbu energije u električnim generatorima i električnim motorima [21].

Učenici gimnazije s magnetizmom se susreću u trećem razredu. Nastavna jedinica "Magnetsko polje električne struje" dolazi na početku nastavne godine, nakon učenja o magnetima i magnetskom polju. Za obradu ove nastavne jedinice predviđeli smo dva školska sata. Oblik nastave koji ćemo izvoditi je istraživački usmjerena nastava fizike. To je oblik nastave fizike koji odražava istraživački karakter fizike



kao znanstvene discipline te potiče smislenije i dublje učenje od tradicionalne predavačke nastave. Istraživački usmjerenom nastavom fizike učenici razvijaju znanstveno razmišljanje i zaključivanje [22].

Ideja je da se ovaj nastavni sat izvodi frontalno uz korištenje sljedećih nastavnih metoda: izvođenje demonstracijskog i istraživačkog pokusa, metoda razgovora, metoda pisanja i crtanja, konceptualna pitanja s karticama. U uvodnom dijelu sata izvodi se demonstracijski Oerstedov pokus. Cilj ovog dijela sata je da učenici uoče da se magnetska igla kompasa zakrenula u blizini vodiča kojim prolazi struja. Učenici raspravom dolaze do zaključka da se oko vodiča kojim prolazi struja stvara magnetsko polje. Stavljanjem kompasa na različite položaje oko vodiča učenici mogu opisati kako izgleda magnetsko polje oko tog vodiča. U središnjem dijelu sata istražuje se o čemu ovisi magnetsko polje vodiča. Učenici u ovom dijelu sata formuliraju hipoteze i osmišljaju pokuse s kojima bi ih mogli ispitati. Istraživački pokusi se izvode frontalno i na temelju njih učenici samostalno iznose svoja opažanja i zaključke. Magnetsko polje strujne petlje i zavojnice proučavaju se pomoću računalne simulacije. Završni dio sata prilika je da učenike upoznamo s elektromagnetima i njihovom širokom primjenom u tehnologiji. Na kraju završnog dijela sata učenici odgovaraju na konceptualna pitanja višestrukog izbora podižući kartice s odgovorom, nakon čega slijedi rasprava o odgovorima.

## 6.2 *Micro:bit uređaj*

Kako bismo učenike još više zainteresirali za ovu nastavnu cjelinu, kao magnetski kompas možemo iskoristiti micro:bit uređaj. Micro:bit je jednostavno mikroročunalo razvijeno s ciljem upotrebe u školama. Micro:bit čini nastavu fizike interaktivnijom i zabavnijom za učenike. Može se koristiti za mjerenje jakosti struje, napona, temperature, ubrzanja i drugih fizikalnih veličina te tako zamijeniti većinu mjernih uređaja koji se koriste u nastavi fizike. Neki senzori se nalaze u samom uređaju, a ostali se mogu lako nabaviti i spojiti. Micro:bit se lako programira s Microsoft blok editorom, Pythonom ili JavaScriptom. Gotovi projekti, kodovi i prikazi spajanja senzora dostupni su za preuzimanje na internetu. Učenike se može uključiti u izradu mjernih uređaja i tako povezati nastavu fizike i informatike. Učenici na ovaj način razvijaju svoje digitalne kompetencije, kreativnost i inovativnost [23]. Jednostavan kod kojim se micro:bit može programirati u magnetski kompas s iglom dostupan je na internetu:

```
from microbit import *
compass.calibrate()
while True:
    sleep(100)
    needle = ((15 - compass.heading()) // 30) % 12
    display.show(Image.ALL_CLOCKS[needle])
```

[24].

## 6.3 *Nastavna priprema: Magnetsko polje električne struje*

### **Predmetni ishodi:**

FIZ SŠ B.3.1. Opisuje svojstva magnetna i analizira vezu između električne struje i magnetizma.

- Objašnjava Oerstedov pokus
- Povezuje smjer električne struje i smjer magnetskog polja oko vodiča
- Skicira vektor magnetskog polja u bilo kojoj točki prostora oko vodiča kojim prolazi struja
- Crta magnetske silnice oko ravnog vodiča
- Uspoređuje oblik linija magnetskog polja ravnog vodiča, strujne petlje i zavojnice

- Objašnjava načelo rada elektromagneta
- Crta magnetske silnice oko ravnog vodiča
- Daje primjer korištenja elektromagneta u svakodnevnom životu
- Tumači matematičke izraze kojima se opisuje magnetsko polje

FIZ SŠ B.3.8. Rješava fizičke probleme.

- Rješava konceptualne fizičke probleme

FIZ SŠ B.3.9. Istražuje fizičke pojave.

- Istražuje fizičke pojave aktivnim sudjelovanjem u izvođenju pokusa

#### **Međupredmetni ishodi:**

- uku A.4/5.1. Upravljanje informacijama
- uku A.4/5.2. Primjena strategija učenja i rješavanje problema
- uku A.4/5.3. Kreativno mišljenje
- uku A.4/5.4. Kritičko mišljenje
- uku D.4/5.2. Suradnja s drugima
- ikt D.5.2. Učenik samostalno predlaže moguća i primjenjiva rješenja složenih problema s pomoću IKT-a.

#### **Tijek nastavnog sata:**

**UVODNI DIO:** U uvodnom dijelu sata motiviramo učenike postavljanjem uvodnog problema te uvodimo novu pojavu kroz opservacijski pokus.

**Uvodni problem:** Hans Christian Oersted rođen je 1777. godine u Danskoj, gdje je završio svoje školovanje te počeo predavati fiziku na sveučilištu. U to vrijeme, većina znanstvenika je mislila da elektricitet i magnetizam nisu povezani. Tijekom izvođenja pokusa na jednom predavanju, Oersted je slučajno opazio da se magnetska igla zakrenula kada je kroz vodič pustio struju [25]. Je li to bila slučajnost ili veliko otkriće, otkrit ćemo u nastavku.

**Opservacijski pokus:** Uz pomoć magnetske igle i micro:bita frontalno izvodimo Oerstedov pokus. Od ostalog pribora potrebni su nam vodiči, izvor napona i stalak kako bismo spojili jednostavan strujni krug. Tražimo od učenika da opišu pribor koji vide.

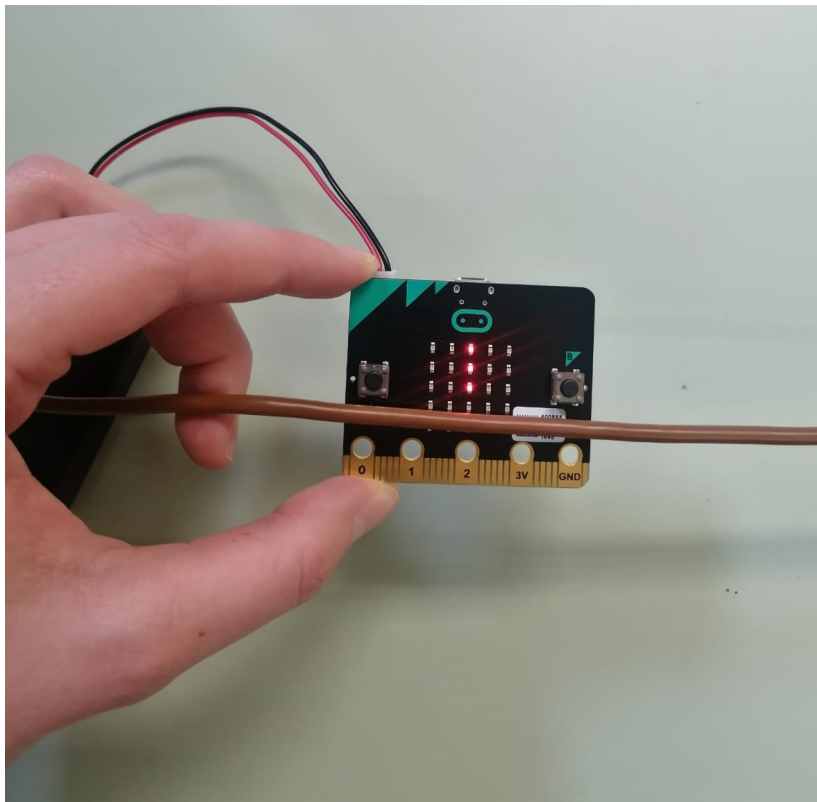
Prije uključivanja napona, vodič postavljamo paralelno s magnetskom iglom. Komentiramo s učenicima što pokazuju magnetska igla i micro:bit kompas (Slika 6.1).

Slika 6.1: Micro:bit postavljen ispod vodiča kojim ne prolazi struja

**Što pokazuje magnetski kompas?** Magnetski kompas pokazuje smjer magnetskog polja.

**Smjer kojeg magnetskog polja pokazuje kompas trenutno?** Kompas pokazuje smjer magnetskog polja Zemlje.

Oerstedov pokus prvo izvodimo s magnetskom iglom. Upućujemo učenike da promatraju što se događa s magnetskom iglom. Nakon izvođenja pokusa s magnetskom iglom, pokus ponavljamo s micro:bitom (Slika 6.2).



Slika 6.2: Micro:bit postavljen ispod vodiča kojim prolazi struja

**Što ste opazili?** Učenici opažaju da se magnetska igla zakrenula okomito u odnosu na vodič kada njime prolazi struja.

**Što mislite, zašto se magnetska igla postavila okomito?** Učenici povezuju okretanje magnetske igle s djelovanjem magnetskog polja na nju.

**Koje magnetsko polje djeluje na iglu? Ima li više izvora magnetskih polja?** Očekujemo da će učenici odgovoriti da na iglu uz magnetsko polje Zemlje, sada još djeluje i magnetsko polje koje dolazi od vodiča kojim prolazi struja.

**Što iz toga zaključujete?** Učenici pišu svoje zaključke, a zatim ih neki od njih čitaju. Učenici nakon postavljenih potpitanja samostalno dolaze do zaključka da je vodič kojim teče struja izvor magnetskog polja. Nakon zaključka uvodimo naslov nastavne jedinice: Magnetsko polje električne struje.

**Što je struja?** Učenici se prisjećaju da je struja usmjereno gibanje naboja.

**Kada je strujni krug bio isključen, naboji su mirovali i magnetska igla kompasa se nije pomicala. Uključivanjem strujnog kruga, naboji se počinju gibati i magnetska igla se zakreće. Što iz toga zaključujete, što je izvor magnetskog polja?** Učenici zaključuju da je naboj koji se giba izvor magnetskog polja.

**SREDIŠNJI DIO:** U središnjem dijelu sata frontalno izvodimo istraživačke pokuse. Prije izvođenja pokusa tražimo od učenika da daju svoje hipoteze i osmisle kako bismo ih testirali. Nakon svakog pokusa učenici zapisuju svoja opažanja.

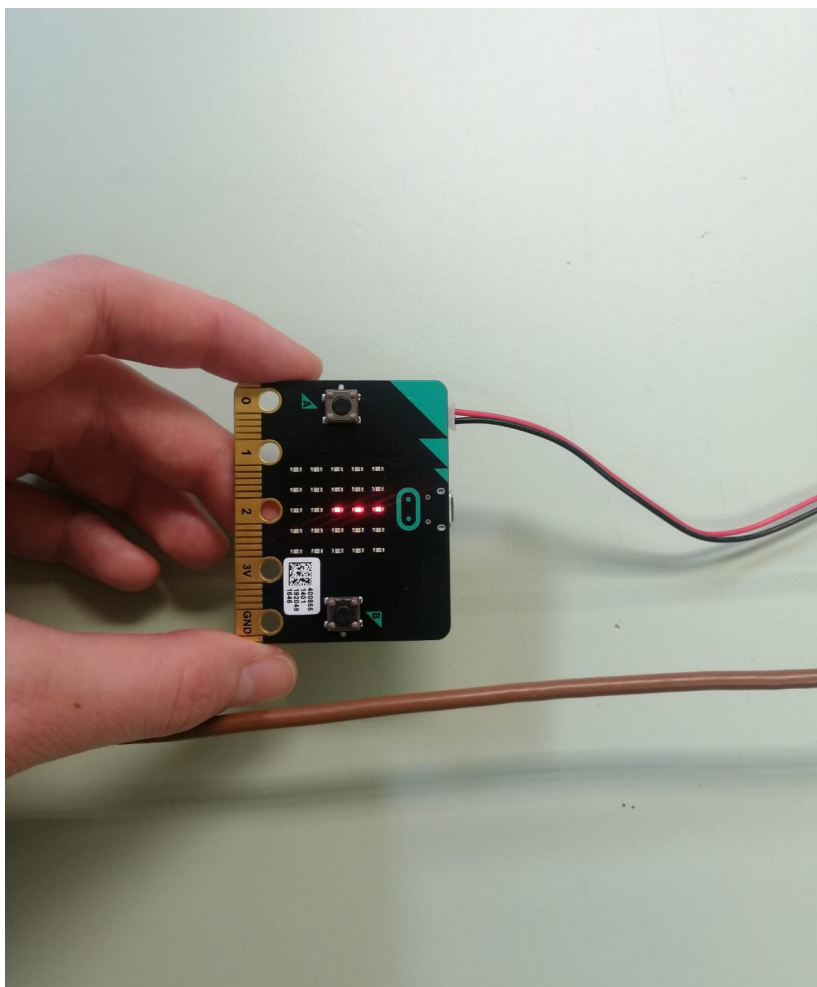
**Istraživačko pitanje 1: Kakvog su oblika linije magnetskog polja oko ravnog vodiča?**

Učenici predlažu stavljanje kompasa na različite položaje oko vodiča. U uvodnom dijelu sata kompas smo stavili ispod vodiča kojim teče struja, a sada ga stavljamo iznad (Slika 6.3).

Slika 6.3: Micro:bit postavljen iznad vodiča kojim prolazi struja

**Što ste opazili?** Učenici opažaju da se magnetska igla opet zakreće okomito u odnosu na vodič, ali u suprotnom smjeru.

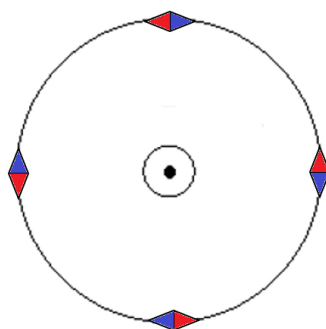
Na kraju postavljamo kompas u horizontalnu ravinu vodiča kojim prolazi struja (Slika 6.4). Istovremeno koristimo i magnetsku iglu kako bi pokus bio jasniji učenicima.



Slika 6.4: Micro:bit u horizontalnoj ravnini s vodičem kojim prolazi struja

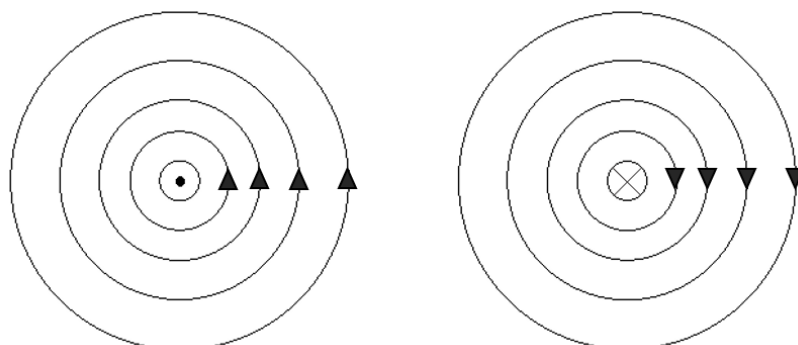
**Što ste opazili?** Učenici opažaju da se u ovom slučaju magnetska igla ne zakreće. **Zašto se magnetska igla ne zakreće?** Učenici zaključuju da se magnetska igla ne zakreće jer je u ovom slučaju magnetsko polje okomito na iglu. Ako će učenici misliti da se igla ne zakreće jer u tom dijelu nema magnetskog polja, možemo zakrenuti vodič u vertikalni položaj i obilaziti s micro bitom oko njega. Skiciramo položaje kompasa na različim mjestima oko vodiča i konstruiramo liniju koja ih povezuje (Slika 6.5). Točka predstavlja smjer struje koja izlazi iz papira, a križić predstavlja smjer struje koja ulazi u papir.





Slika 6.5: Konstruiranje linije magnetskog polja

Što iz toga možete zaključiti o obliku linija magnetskog polja? Učenici zaključuju da su linije magnetskog polja zakrivljene linije oko vodiča kojim teče struja. Uvodimo pravilo desne ruke. Smjer linija magnetskog polja određen je pravilom desne ruke. Palac pokazuje smjer struje, a savijeni prsti pokazuju smjer linija magnetskog polja. Na ploču crtamo linije magnetskog polja za smjer struje koja izlazi iz papira i smjer struje koja ulazi u papir (Slika 6.6).



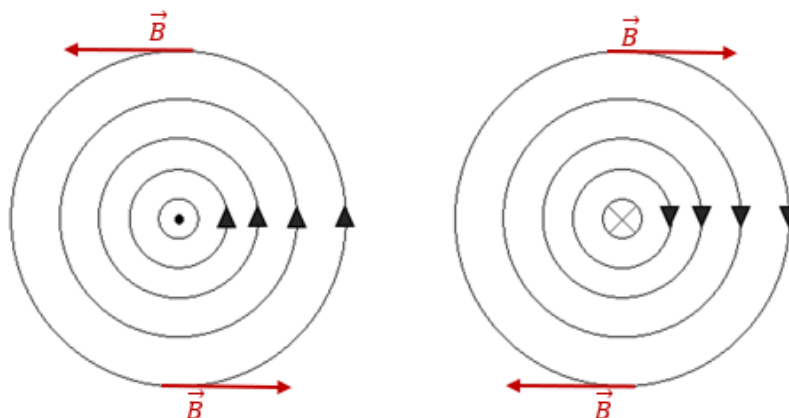
Slika 6.6: Linije magnetskog polja

**Što mislite, što će se dogoditi ako promijenimo smjer struje?** Pomoću pravila desne ruke, učenici zaključuju da će se i smjer linija magnetskog polja promijeniti. Mijenjamo smjer struje i stavljamo kompas ispod i iznad vodiča (Slike 6.7 i 6.8).

Slika 6.7: Micro:bit ispod vodiča kojim prolazi struja

Slika 6.8: Micro:bit iznad vodiča kojim prolazi struja

Učenici skiciraju oba slučaja u bilježnicu i pišu zaključak o obliku linija magnetskog polja. Zatim u grupama crtaju vektor magnetskog polja pomoću linija polja za različite položaje u koje smo stavljali kompas (Slika 6.9).



Slika 6.9: Vektori magnetskog polja

### Istraživačko pitanje 2: O čemu ovisi iznos magnetskog polja ravnog vodiča?

Učenici daju svoje hipoteze i predlažu kako bismo ih mogli ispitati. Učenici su u prethodnom pokusu zaključili da je struja izvor magnetskog polja, pa očekujemo da će predložiti hipotezu da iznos magnetskog polja ovisi o jakosti struje. Navodimo učenike da povuku analogiju s električnim poljem i predložiti hipotezu da magnetsko polje ovisi i o udaljenosti od izvora. U ovom pokusu bitno je da je postav pokusa dobro vidljiv svim učenicima kako bi mogli vidjeti promjene u smjeru koje pokazuje magnetska igla.

Ovisnost iznosa magnetsko polja o udaljenosti ispitujemo udaljavanjem kompasa od vodiča kojim teče struja.

**Što ste opazili? Slaže li se to s vašim hipotezama?** Učenici opažaju da udaljavanjem kompasa od vodiča magnetska igla vraća u položaj u kojem je bila kad vodičem nije tekla struja.

Ovisnost iznosa magnetskog polja o jakosti struje ispitujemo smanjivanjem jakosti struje na izvoru.

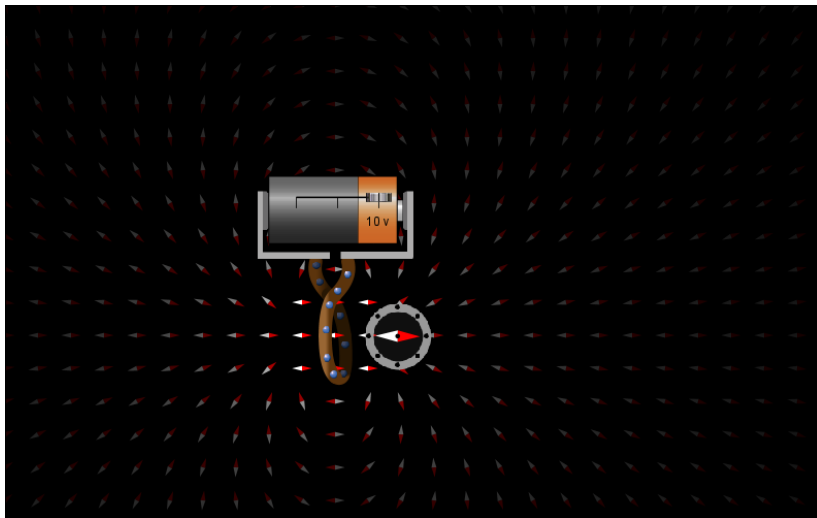
**Što ste opazili? Slaže li se to s vašim hipotezama?** Učenici opažaju da smanjivanjem struje koja teče kroz vodič slabi utjecaj magnetskog polja struje na kompas.

Nakon izvedenih pokusa učenici donose zaključak da se iznos magnetskog polja

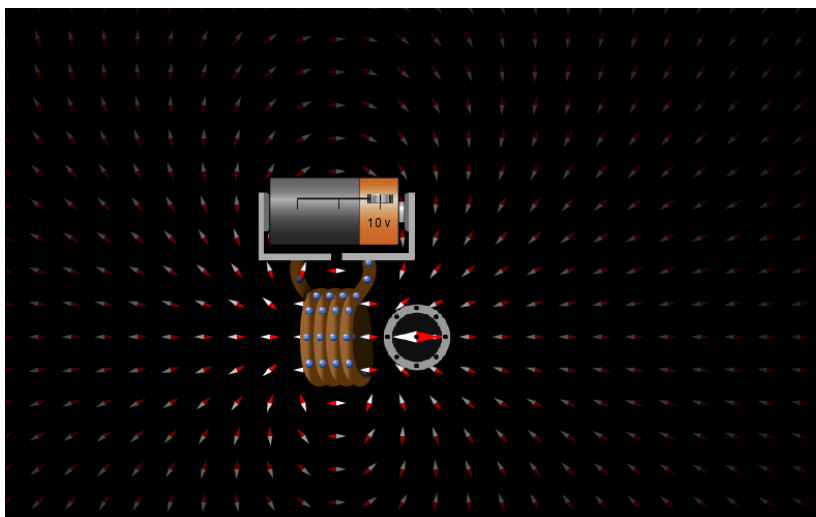
vodiča kojim teče struja povećava ako se povećava jakost struje, a smanjuje se što je veća udaljenost od vodiča. Nakon kvalitativnih razmatranja, napominjemo učenicima da bismo mjerenjem došli do matematičkog oblika za iznos magnetskog polja na nekoj udaljenosti ( $r$ ) od vodiča kojim teče struja ( $I$ ) (6.1). Iznos magnetskog polja proporcionalan je s jakošću struje, a obrnuto proporcionalan s udaljenošću od vodiča. Uvodimo magnetsku permeabilnost  $\mu$  kao svojstvo prostora o kojem također ovisi iznos magnetskog polja. U vakuumu je magnetska permeabilnost  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}$ . Magnetska permeabilnost sredstva je umnožak permeabilnosti vakuuma i relativne magnetske permeabilnosti sredstva ( $\mu_r$ ).

$$B = \mu \frac{I}{2\pi r} \quad (6.1)$$

**Kako će se promijeniti linije magnetskog polja ako ravni vodič savinemo?** Učenici pretpostavljaju da su linije magnetskog polja i dalje kružnice. Magnetsko polje strujne petlje i zavojnice učenicima pokazujemo pomoću računalne simulacije (Slike 6.10 i 6.11) [26].



Slika 6.10: Magnetsko polje strujne petlje



Slika 6.11: Magnetsko polje zavojnice

Na što vas podsjećaju magnetsko polje struje petlje i zavojnice? Učenici se prisjećaju magnetskog polja štapnog magneta.

Uvodimo pravilo desne ruke za smjer silnica magnetskog polja strujne petlje i zavojnice. Savijeni prsti pokazuju smjer struje koja prolazi kroz petlju/zavojnicu, a palac pokazuje smjer magnetskog polja.

Što mislite, razlikuju li se iznosi magnetskog polja kod strujne petlje i zavojnice? Učenici uočavaju da je zavojnica niz naslaganih petlji te pretpostavljaju da je magnetsko polje zavojnice većeg iznosa od magnetskog polja strujne petlje.

Izraz za iznos magnetskog polja u središtu petlje dobiven je na temelju mjerenja. Iznos magnetskog polja ovisi o magnetskoj permeabilnosti ( $\mu$ ), proporcionalan je s jakošću struje ( $I$ ), a obrnuto proporcionalan s polumjerom petlje ( $R$ ) (6.2).

$$B = \mu \frac{I}{2R} \quad (6.2)$$

Kad zavojnicom prolazi struja, unutar nje se stvara homogeno magnetsko polje. Takvo polje u svakoj točki ima jednak iznos. Izraz za iznos magnetskog polja unutar zavojnice dobiven je na temelju mjerenja. Iznos magnetskog polja ovisi o magnetskoj permeabilnosti ( $\mu$ ), proporcionalan je s jakošću struje ( $I$ ) i brojem zavoja ( $N$ ), a obrnuto proporcionalan s duljinom zavojnice ( $l$ ).

$$B = \mu \frac{NI}{l} \quad (6.3)$$

**ZAVRŠNI DIO:** Završni dio sata koristimo za upoznavanje učenika s primjenom konstruiranih modela.

Zavojnica kojom prolazi električna struja izvor je magnetskog polja te se naziva elektromagnet.

**Kako možemo povećati magnetsko polje elektromagneta?** Učenici odgovaraju da magnetsko polje zavojnice možemo povećati tako da povećamo broj namotaja, smanjimo duljinu zavojnice ili povećamo struju.

**Možemo li promijeniti permeabilnost?** Učenici iz izraza za permeabilnost zaključuju da ju možemo promijeniti povećavanjem relativne magnetske permeabilnosti koja ovisi o sredstvu. Vodimo učenike do zaključka da u zavojnicu možemo staviti feromagnetsku jezgru koja će znatno povećati magnetsko polje zavojnice.

Upoznajemo učenike sa širokom primjenom elektromagneta u kućanstvu (zvučnik, električno zvono), tehnici (dizalica, elektromotori, generatori), medicini (magnetska rezonancija) i znanosti (ubrzivači, fuzijski reaktori).

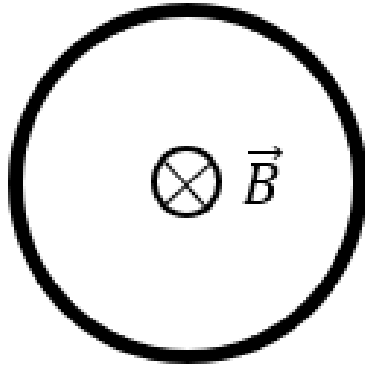
Na kraju završnog dijela sata učenicima podijelimo kartice sa slovima A, B, C, D kojima oni odgovaraju na pitanja. Nakon svakog pitanja raspravljamo o odgovorima. Na ovaj način možemo provjeriti koliko su učenici razumjeli novo gradivo i kako ga primjenjuju.

1. Kakav je iznos magnetskog polja oko ravnog vodiča ako se udaljimo na dvostruko veću udaljenost od početne?

- a) Iznos magnetskog polja je dvostruko veći.
- b) Iznos magnetskog polja je dvostruko manji.
- c) Iznos magnetskog polja se ne mijenja.

Iznos magnetskog polja je obrnuto proporcionalan s udaljenošću od vodiča, pa će iznos magnetskog polja u ovom slučaju biti dvostruko manji.

2. Na slici je prikazana petlja i označen je smjer magnetskog polja u središtu petlje.



Je li u prikazanoj petlji struja u smjeru kazaljke na satu ili obrnuto?

- a) Struja u petlji je u smjeru kazaljke na satu.
- b) Struja u petlji suprotna je smjeru kazaljke na satu.

Primjenom pravila desne ruke učenici zaključuju da je struja u petlji u smjeru kazaljke na satu.

3. Zamislite dva usporedna vodiča. Je li magnetsko polje u prostoru između njih većeg iznosa ako su struje u istim ili suprotnim smjerovima?

- a) Iznos magnetskog polja je veći ako su struje u vodičima u istim smjerovima.
- b) Iznos magnetskog polja je veći ako su struje u vodičima u suprotnim smjerovima.

Korištenjem pravila desne ruke za određivanje smjera magnetskog polja učenici zaključuju da će magnetsko polje u prostoru između dva vodiča biti veće ako su struje u suprotnim smjerovima.

## Literatura

- [1] Li, W.; Wang, J.: Magnetic Sensors for Navigation Applications: An Overview. The Journal of Navigation. Vol. 67, 2 (2014.), 263-275
- [2] Ripka, P. Review of fluxgate sensors. Sensors and Actuators A, 33 (1992.), 129-141
- [3] Wang, J.; Chen, X.: A fluxgate magnetometer for navigation and sensing: Noise character and digital filtering. 2015 IEEE SENSORS, Busan, South Korea (2015.), 1-4
- [4] Feynman lectures: Magnetostatics. [https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II\\_13.html](https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_13.html), 10.12.2021.
- [5] Spaldin, N. Magnetic Materials: Fundamentals and Applications. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2010.
- [6] Young, H. D.; Freedman, R. A.; University Physics with Modern Physics. 13th ed. San Francisco: Pearson Education, 2004.
- [7] Griffiths, D. Introduction to Electrodynamics. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- [8] Omar, M. Elementary Solid State Physics: Principles and Applications. Addison-Wesley Publishing Company, 1993.
- [9] Elektromagnetska polja - Magnetostatika, [https://www.fer.unizg.hr/\\_download/repository/2\\_materijali\\_magnetostatika.pdf](https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/2_materijali_magnetostatika.pdf), 3.12.2020.
- [10] Paić, M. Osnove fizike: 3. dio. Zagreb: Sveučilišna naklada Liber, 1989.
- [11] Solarić, M.; Solarić N.: Povijesni pregled uporabe magnetskoga kompasa, osnovni princip rada elektroničkoga kompasa i autonavigacije. Geodetski list, 2 (2009), 89-116
- [12] Solarić, M.; Solarić N.: Povijesni pregled širenja znanja o geomagnetizmu i njegovim promjenama. Geodetski list, 4 (2008), 211-233



- [13] National centers for environmental information: Geomagnetism, <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/faqgeom.shtml>, 7.12.2020.
- [14] Inklinacija, <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=>, 19.12.2020.
- [15] Earth's magnetic field, [https://web.ua.es/docivis/magnet/earths\\_magnetic\\_field2.html](https://web.ua.es/docivis/magnet/earths_magnetic_field2.html), 7.12.2020.
- [16] World Magnetic model, <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/back.shtml>, 6.12.2020.
- [17] Stepanić, J. Zrakoplovni instrumenti za navigaciju. Zagreb, 2015.
- [18] Primdahl, F. The fluxgate magnetometer. Journal of Physics E: Science Instruments. Vol. 12, 4 (1979.), 241-253.
- [19] Callister, M.D. Fundamentals of Materials Science and Engineering. John Wiley and Sons, 2001.
- [20] Labor, J; Zelenko Paduan, J: Fizika 3. Zagreb: Alfa, 2020.
- [21] Elektromagnet, <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=17626>, 16.1.2021.
- [22] Planinić, M: Istraživački usmjerena nastava fizike - kako je približiti školskoj zbilji?. Zbornik radova XII. hrvatskog simpozija o nastavi fizike (2015.), 8-14
- [23] Turković, T.: Micro:bit mjerni instrumenti u nastavi fizike. Zbornik radova XIV. hrvatskog simpozija o nastavi fizike (2019.), 72-76
- [24] Micro:bit module Compass, <https://microbit-micropython.readthedocs.io/en/v1.0.1/compass.html>, 8.1.2020.
- [25] July 1820.: Oersted & Electromagnetism, <https://www.aps.org/publications/apsnews/200807/physicshistory.cfm>, 27.1.2021.
- [26] Phet simulator, <https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/faraday/latest/faraday.html?simulation=magnets-and-electromagnets>, 10.1.2021.