

UDK 550.380.84(091):528.236.5:537.6:629.331.072:621.389
Pregledni znanstveni članak

Povijesni pregled uporabe magnetskoga kompasa, osnovni princip rada elektroničkoga kompasa i autonavigacije

Miljenko SOLARIĆ, Nikola SOLARIĆ – Zagreb¹

SAŽETAK. U članku je dan povijesni pregled širenja znanja o magnetskim kompasima i njihova primjena u geodeziji, rudarskim mjerenjima i navigaciji na moru. Osim toga opisan je princip rada elektroničkoga kompasa, koji radi na principu magnetskog otpora ili Hallova efekta. Zatim je pojašnjen utjecaj magnetske indukcije izazvane Zemljinim magnetskim poljem u fizičkom tijelu automobila i način njegova kompenziranja. Na kraju je opisana integracija GPS-prijamnika, elektroničkoga kompasa i brojača okreta kotača automobila u suvremenoj navigaciji u automobilima.

Ključne riječi: magnetizam, geomagnetizam, magnetska deklinacija i inklinacija, magnetski kompas, elektronički kompas, digitalni kompas, magnetski senzor, utjecaj broda na magnetski kompas, magnetski otpor, Hallov efekt, utjecaj automobila na elektronički kompas, navigacija u automobilima.

1. Uvod

U ovom preglednom radu dan je povijesni pregled korištenja magnetskih kompasa i njihova uporaba.

Istina je da geodeti već podavno ne koriste mjerenje magnetskih azimuta u geodetskim busolnim vlakovima. Međutim, danas se uz satelitsku GPS-navigaciju u automobile ugrađuju elektronički magnetski kompasi kako bi s brojačem okreta kotača automobila (tj. duljinom prijeđenog puta) nadomjestili nedostatak satelitske GPS-navigacije, kada nije dovoljno čist nebeski svod iznad GPS-antene, na primjer u tunelima, visokim usjecima i uskim gradskim ulicama. Upravo je zato

¹Dr. sc. Miljenko Solarić, umirovljeni profesor Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u trajnom zvanju redovitog profesora, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: miljenko.solaric@geof.hr, dr. sc. Nikola Solarić, profesor emeritus, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: nikola.solaric@geof.hr.

potrebno znati kakvi sve utjecaji utječu na magnetsku iglu i u kako dugim vremenskim razmacima mogu se koristiti podaci elektroničkoga kompasa između dvaju GPS-određivanja položaja automobila.

Osim toga predviđa se i uporaba magnetskoga kompasa u nekim novim konstrukcijama geodetskih pomagala.

2. Magnetski kompas

Magnetski kompas² stari je kineski pronalazak, koji je prvi put izrađen vjerojatno za dinastije Qin (221. – 206. godine prije Krista) (URL 2). Kineske gatare (vračare) upotrebljavale su magnet kako bi proricale budućnost. Tako je netko primijetio da se magnet postavlja u određenom smjeru. To je vodilo do izrade magnetskog kompasa, koji je postavljen na kamenu ili brončanu ploču, na kojoj su označene glavne točke za orijentaciju (sjever, jug, istok i zapad). Magnetska igla bila je izrađena u obliku žlice, držak koje je pokazivao jug (sl. 2.1) (URL 2) i (URL 3). Čini se da je tako bilo u 8. stoljeću, a magnetski su kompasi postali uobičajeni na brodovima u Kini između 850. i 1050. godine. U ranom 11. stoljeću magnetske igle bile su postavljene na plovcima na vodi (sl. 2.2). Poslije su se magnetske igle postavljale da vise na svilenim koncima ili da su podbočene s nekom osi. Tako su magnetski kompasi postali manjih dimenzija i portabilni te prikladniji za navigaciju (sl. 2.3).



Slika 2.1. Stari magnetski kompas iz Kine (URL 2).



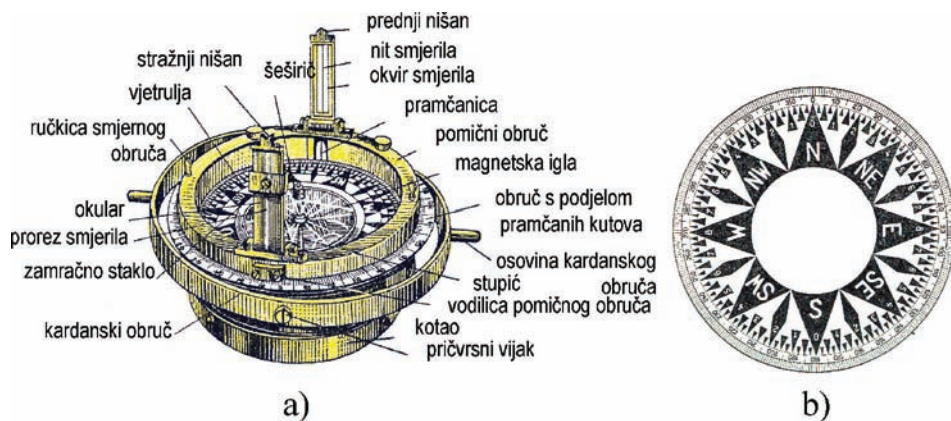
Slika 2.2. Ploveći magnetski kompas, kojem je magnetska igla pričvršćena na dva plovka (od trske ili pluta) uronjena u posudu s vodom (URL 2).

² Kompas (talijanski *compasso* – šestar) (O. encikl. 1978, sv. 4, str. 476).



Slika 2.3. Suhi kineski magnetski kompas (URL 2).

Nakon 1551. godine magnetski kompas se stavlja u kardanski sustav (zglob) (sl. 2.4.a) te se prvi put susreće naziv *magnetski kompas*.



Slika 2.4. a) *Magnetski kompas u kardanovu ležaju*, b) *Ruža vjetrova* (prema Tehn. encikl. 1966, sv. 2, str. 313 i 314).

Arapski trgovci vjerojatno su prenijeli magnetski kompas u Europu u 10. stoljeću, a jednostavnije vrste kompasa bile su u upotrebi u području Sredozemlja u 12. stoljeću (URL 3). U našim krajevima magnetski kompas se nazivao “*kalamita*”³. Magnetski kompas koristio se već 1248. godine za određivanje azimuta, što je dokumentirao francuski pomorac, vojnik i inženjer Petrus Peregrinus de Maricourt i u često citiranom “*Epistola Petri Peregrini de Maricourt ad Sygerum de Foucaucourt militem, de magnetis*”, obično znanom pod skraćenim nazivom “*Epistola de Magnete*” iz 1269. godine (Benković i dr. 1986, str. 36), (O. encikl. 1979, sv. 5, str.

³ Kalamita (talijanski *calamita* – znači magnet) Klaić – 1990, g. str. 645.

245) i (URL 5). To je zapravo pismo upućeno vojniku Sygerumu de Foucaucourt u kojem se prvi put detaljnije opisuje navigacija pomoću magnetske igle.

U (URL 3) tvrdi se da je admiral Zeng He (1371. – 1435.) iz kineske provincije Yunnan prvi zapisalo upotrebu magnetskoga kompasa u navigaciji brodova na moru. On je između 1405. i 1433. godine bio na sedam oceanskih putovanja i prvi je Kinez koji je doplovio 1418. godine do Kenije (Horning, Wagner 2005).

U 14. stoljeću pojavili su se magnetski kompasi kojima se igla oslanjala na vrh osovine i na njemu njihala, a podjela na rubu limba izražena je u lučnim stupnjevima 360o (sl. 2.4.b). (Prije se na rubove postavljala podjela od 12, 24 ili 32 točke.) Talijani su ispod magnetske igle postavljali latinsku ružu vjetrova od 12 vjetrova i tako je nastao *suhi magnetski kompas* (današnji naziv).

3. Uporaba kompasa u geodeziji

Mjerenje magnetskih azimuta osniva se na svojstvu magnetske igle da, poduprta u svojem težištu, nakon umirenja zauzme stalan položaj na pravcu magnetskih polova.

To znanje o svojstvu magnetske igle koje je preneseno iz Kine u Europu najprije su koristili pomorci, a zatim su astronomi, geodeti i rudari nastojali iskoristiti to svojstvo za izmjere gdje se nije tražila visoka točnost. Tako su se "*busolni vlakovi*" koristili na primjer u lokalnoj izmjeri šuma i u rudarskim kopovima (Macarol 1976). Čak i danas se busolni vlakovi koriste u rudarstvu u nedostatku skupih inercijskih sustava.

Kako bi geodeti mogli izmjeriti magnetske azimute stranica busolnih vlakova, morali su imati na raspolaganju instrumente za mjerenje magnetskih azimuta, tj. kutova između smjera magnetskog sjevera i smjera na sljedeću točku busolnog vlaka.

Za ucrtavanje na kartu Rima bila je korištena kružna ploča s ugrađenim kompasom 1510. godine (De Bono 2005, str. 323).

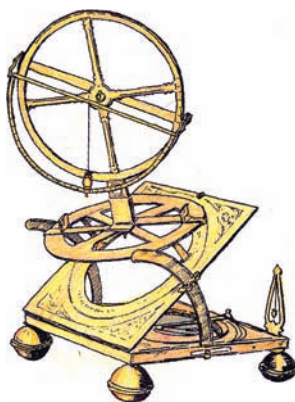
Tako su bili izrađeni neki instrumenti pomagala:

- prije nego što je Leonard Diggest dao prvi opis teodolita u knjizi "*Pantometria*", koju je izdao njegov sin Thomas 1571. godine, a on je smislio i naziv teodolit za taj instrument,
- prije nego što je dalekozor Nizozemac Hans Lipperhey (1570. – 1619.) iz Middleburga izumio i patentirao, kada je 1608. godine stavio jednu leću ispred druge i otkrio efekt dalekozora. Naime, on je promatrao pijevca na udaljenom šiljastom crkvenom krovu kroz par leća i opazio da ga vidi uvećanog. Mnogi povjesničari znanosti vjeruju da je on prvi otkrio princip na kojem radi dalekozor (De Bono 2005, str. 321 – 323). To njegovo patentno pravo pokušali su osporiti Jacob Maetius iz Alkmaara, a poslije i Sacharias Janssen iz Middelburga (URL 12). Međutim, u časopisu "Gvardian" tvrdi se da su se pojavili dokumenti koji pokazuju da je Lipperheya u tome, za nekih petnaestak godina, pretekao jedan Španjolac. Sudeći prema oporuci Don Pedra de Carolona iz Barcelone on je ostavio teleskop svojoj udovici. Kako je umro 1593. godine, to znači da je tele-

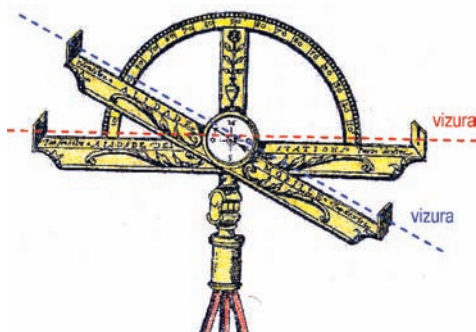
skop posjedovao najmanje petnaestak godina prije nego što ga je Lipperhey 25. rujna 1608. godine svečano predstavio gradskim čelnicima grada Haaga. Tjedan dana nakon prezentacije Lipperhey je podnio zahtjev za patentiranje svojeg izuma, nakon čega su se počele širiti vjerne replike prvo Nizozemskom, a zatim i Europom.

Britanski povjesničar Nick Pelling tvrdi kako je teleskop postojao u Španjolskoj mnogo prije nego u Nizozemskoj, te se možda čak i proizvodio u određenim količinama. Zahvaljujući pomorskim vezama teleskop je iz Španjolske stigao u Nizozemsku, a Lipperhey se “samo prvi dosjetio da ga patentira” (Krešić 2008).

Magnetski kompas bio je postavljen u središte *zemljomjerskih grafometara* (3.2), gdje se viziralo gledačama (tj. s pomoću nišana i mušice – čisto vizualno, prostim okom). Takvi instrumenti s magnetskim kompasom upotrebljavali su se i u astronomiji (sl. 3.1). Torket (torquetum ili turquet) upotrebljavali su astronomi za mjerenja u tri koordinatna sustava: horizontalnom, ekvatorijalnom i ekliptičkom.



Slika 3.1. *Astronomski univerzalni instrument – torket (torquetum ili turquetom) opremljen viskom i magnetskom iglom u središtu. Izradio ga je Erasmus Habermel prema Regiomontanovu torketu iz 1470. godine (prema Korošec 1978).*



Slika 3.2. *Zemljomjerni grafometar s magnetskim kompasom, rad briselskoga preciznog mehaničara Phillippa Danfria iz 1597. godine (prema Korošec 1978).*

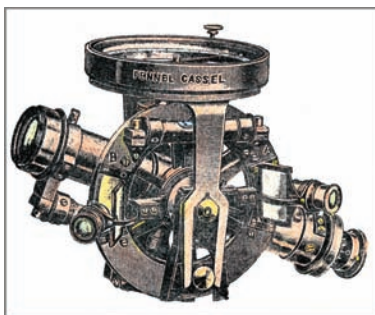
Geodetski instrumenti bili su na početku izrađeni bez optičkih dalekozora s gledačama (s nišanom i mušicom), a u sredini su imali magnetski kompas. Prvi teodoliti koji su imali optičke dalekozore za viziranje – nišanje (ciljanje na ciljeve) bili su oni koje je izrađivao Englez Jonathan Sisson oko 1730. godine (sl. 3.3) (De Bono 2005, str. 321). Na slikama od 3.3 do 3.5 vide se različiti geodetski instrumenti u kojima su ugrađeni magnetski kompas.



Slika 3.3. *Sissonov teodolit s magnetskim kompasom (prvi teodolit s optičkim durbinom 1730. godine) koji je izradio Cooke, Troughton & Simms of York, Engleska (URL 7).*



Slika 3.4. *Busolni teodolit Thomasa Jeffersona 1778. godine (predsjednika SAD-a od 1801. do 1809. godine), koji je izradio Jesse Ramsden (URL 6).*



Slika 3.5. Fennel – Casselov teodolit s magnetskim kompasom (prema Macarol 1977).



Slika 3.6. Magnetska igla kakva se često koristila za orijentaciju geodetskih topografskih stolova.

4. Magnetiziranje magnetskih materijala

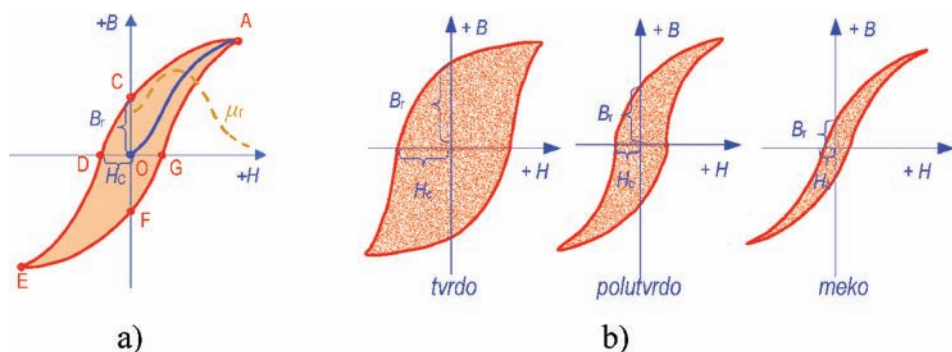
Iz fizike je poznato da se nemagnetizirano željezo u magnetskom polju magnetizira. Veličina magnetske indukcije ovisi o jačini magnetskog polja, a mjerenjem jačine magnetske indukcije B^4 u ovisnosti o jačini magnetskog polja H dobije se krivulja “*histereze*” (sl. 4.1.a).

Do pojedinih dijelova krivulje “*histereze*” dolazi se ovako:

- OA – dio je krivulje početnog magnetiziranja feromagnetičnog materijala (željeza) (na sl. 4.1.a označeno plavom bojom). Iz grafikona se vidi da se ta ovisnost postupno povećava, ali tako da u točki A postiže maksimalnu vrijednost.
- AC – dio je krivulje kad se smanjuje jačina magnetskog polja do vrijednosti $H=0$. Zaostala magnetska indukcija B_r (tj. odsječak OC), pri vrijednosti $H=0$, naziva se *remanentni* ili *zaostali magnetizam*. To znači da će feromagnetični materijal ostati djelomično magnetičan iako se ne nalazi u magnetskom polju, tj. gdje je magnetska jakost u tom smjeru jednaka nuli.
- CD – je dio krivulje koji je nastao promjenom smjera jačine magnetskog polja i njegovim povećavanjem tako da u točki D feromagnetični materijal nije više magnet. Pritom vrijednost jačine magnetskog polja H_c (tj. odsječak OD) kad feromagnetični materijal više nije magnetičan naziva se *koercitivnom silom*.

⁴ $B = \mu_r H$, gdje je μ_r koeficijent permeabilnosti, predstavlja koeficijent proporcionalnosti između jačine magnetskog polja H i jačine magnetske indukcije B .

DEFGA – dio je krivulje koji nastaje kada daljnja promjena jakosti magnetskog polja H izaziva promjenu magnetske indukcije B prema slici 4.1.a.



Slika 4.1. a) Krivulja magnetske "histereze", b) Krivulje magnetske "histereze" za različite vrste željeza.

Površina između krivulja ACDEFGA predstavlja gubitak energije, koji je prešao u toplinsku energiju prilikom svakoga potpunoga ponovnog magnetiziranja.

Krivulja μ_r na sl. 4.1.a predstavlja promjenu permeabilnosti materijala pod djelovanjem jačine magnetskog polja H . Iz toga grafikona vidi se da se magnetska permeabilnost (magnetska "provodljivost") asimptotski smanjuje prema nuli pri dovoljnom povećanju jačine magnetskog polja, tj. da se tada nalazi u fazi zasićenja.

5. Brodski magnetizam⁵

Na početku su brodovi bili izrađeni samo od drveta. Tada nije bilo problema u primjeni magnetskih kompasu u navigaciji na morima i oceanima.

Prvi brod kompozitne gradnje (građen jednim dijelom od željeza, a drugim dijelom od drveta) bio je parobrod sagrađen 1839. godine (Tehn. encikl. 1966, sv. 2, str. 161). Poslije su brodovi izgrađivani od još više željeza, pa čak gotovo isključivo od različitih vrsta željeza, koji imaju različita magnetska svojstva, tj. različite krivulje magnetske histereze (sl. 4.1.b). Zbog toga što je željezo feromagnetično, javljaju se veliki problemi u primjeni magnetskih kompasu na željeznim brodovima.

Naime, sam brod u Zemljinu magnetskom polju postaje zbog magnetske indukcije magnet velikih dimenzija.

5.1 Postanak broskog magnetizma

Cijeli brod, pa tako i svaki njegov dio, nalazi se u Zemljinu magnetskom polju, koje je za njega vanjsko magnetsko polje. Različiti materijali od kojih je brod sastavljen različito međusobno djeluju s magnetskim poljem Zemlje. To međusobno dje-

⁵ Brodski magnetizam, ali slično tako i magnetizam automobila.

lovanje ovisit će o strukturi i magnetskim svojstvima materijala, a mogu ga pojačati, oslabiti ili ne utjecati na njega.

Radi lakšeg praćenja prikaza sve mase materijala od kojih je izgrađen brod prikazat će se u pojednostavljenom obliku kao štapovi.

Veličina magnetske indukcije u horizontalnom brodskom željezu (B_H) izazvana Zemljinim magnetskim poljem može se izraziti jednadžbom:

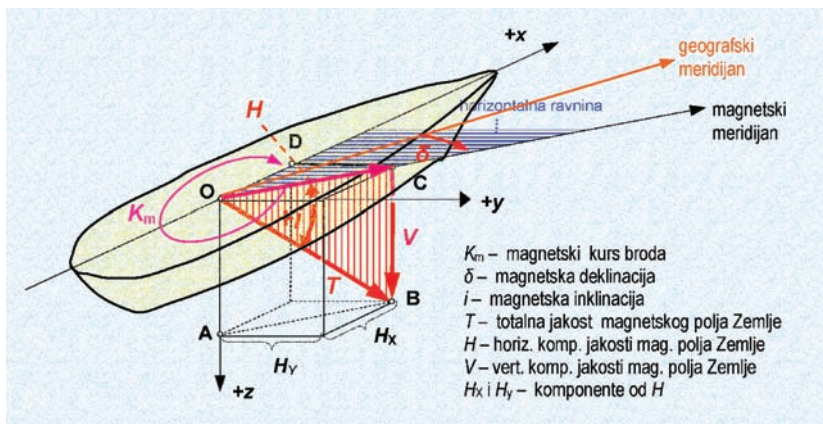
$$B_H = \mu_a H \cos(K_m),$$

gdje je:

μ_a – apsolutna magnetska permeabilnost materijala (magnetska “provodljivost”),
 H – horizontalna komponenta vektora jačine Zemljina magnetskog polja, koja je jednaka $H = T \cos(i)$, gdje je T – totalni intenzitet magnetskog polja, a “ i ” kut magnetske inklinacije (Solarić, M. i N. 2007),

K_m – kut u horizontalnoj ravnini između magnetskih silnica i smjera kretanja broda (mjereno u smislu gibanja kazaljke na satu), tj. je magnetski kurs kretanja broda (sl. 5.1).

Veličina magnetske indukcije u vertikalnom brodskom željezu (B_V) izazvana Zemljinim magnetskim poljem može se izračunati iz slične jednadžbe, ali treba uzeti u obzir vertikalnu komponentu jačine Zemljina magnetskog polja koja je jednaka $V = T \sin(i)$.



Slika 5.1. Koordinatni sustav kompas i ostale veličine vektora totalne jakosti Zemljina magnetskog polja (K_m – magnetski kurs broda).

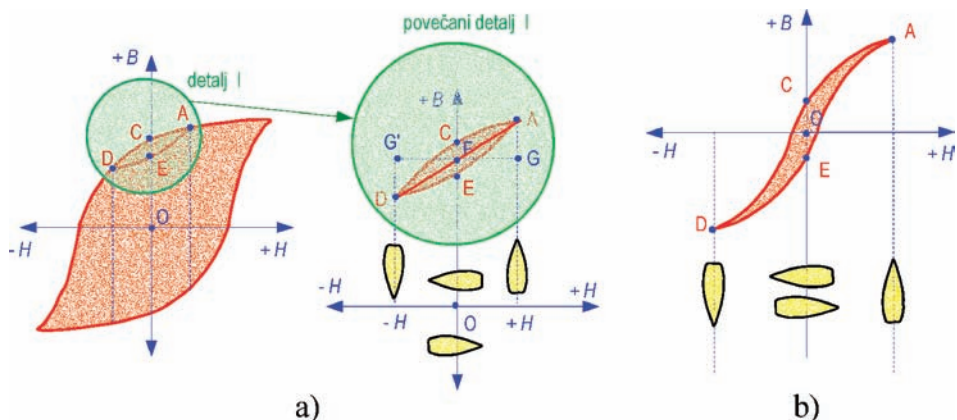
5.2 Stalni brodski magnetizam

Stalni brodski magnetizam nastaje u brodskom *tvrdom željezu* zbog indukcije vektorom jačine Zemljina magnetskog polja (T), gotovo isključivo za vrijeme gradnje broda. Naime, kada se željezni štap postavi u smjeru Zemljina magnetskog polja i izloži mnogobrojnim udarcima ili potresima, onda se orijentacija mikrostrukture

u željezu postavi u smjer Zemljina magnetskog polja i takav komad željeza dobije svojstva praktički stalnih magneta. Tako na primjer različiti automatski željezni maljevi u industriji raspolažu svojstvima stalnih magneta kojih su polja orijentirana prema smjeru Zemljina polja. Zato i velika konstrukcija željeznog broda, za vrijeme gradnje, uslijed mnogobrojnih udara dobije svojstva stalnih magneta.

Kako je koercitivna sila (H_c) tvrdog željeza znatno veća od inducirajuće sile Zemljina magnetskog polja, inducirani magnetizam nastao za vrijeme gradnje broda ostaje praktički trajno i nakon gradnje.

Brodski magnetizam nastao za vrijeme gradnje broda ne zadržava svoju vrijednost konstantnom, već se mijenja u malim granicama, kao što se vidi na sl. 5.2.a, gdje je prikazana promjena magnetske indukcije u uzdužnom željezu tijekom plovidbe. (Tako bi se to moglo prikazati i za poprečno i vertikalno brodsko željezo.)



Slika 5.2. a) Promjena stalnoga brodskog magnetizma u uzdužnom brodskom željezu u ovisnosti o smjeru kretanja broda, b) Promjenjivi brodski magnetizam u uzdužnom brodskom željezu u ovisnosti o smjeru kretanja broda.

Na desnom dijelu slike 5.2.a, detalju I, nacrtan je isječak histereze u području promjena horizontalne komponente od $+H$ do $-H$, gdje se vidi kolika je promjena stalnoga brodskog magnetizma u ovisnosti o magnetskom kursu tijekom plovidbe. Kada brod plovi u kursu $K_m = 0^\circ$, magnetska indukcija ima vrijednost u točki A, a s promjenom kursa K_m u krugu od 360° stalni magnetizam će se mijenjati po krivulji ACDEA (sl. 5.2.b). S obzirom na oblik krivulje histereze, ta se krivulja može aproksimirati pravcem AFD za slučaj velike koercitivne sile. Tako se može izvesti zaključak da se stalni brodski magnetizam sastoji od konstantne vrijednosti OF s amplitudom promjena $AG=DG'$, koju nazivamo promjenjivim dijelom stalnoga brodskog magnetizma.

5.3 Promjenjivi brodski magnetizam

Promjenjivi magnetizam broda nastaje u njegovu *mekom željezu*, u kojem je koercitivna sila znatno manja od jačine Zemljina magnetskog polja (sl. 5.2.b).

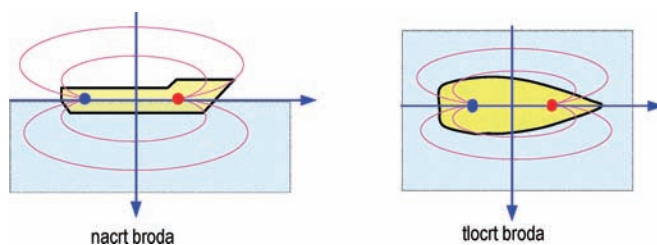
Pri vožnji u kursu $K_m = 0^\circ$ inducirani magnetizam ima vrijednost koja odgovara veličini ordinate točke A, a promjenom kursa vožnje u krugu od 360° inducirani magnetizam mijenja se po krivulji ACDEA. Potpuno je razumljivo da se pri promjeni magnetskoga kursa vožnje magnetska indukcija ne mijenja trenutačno već da zaostaje za izvjesnu vrijednost u odnosu na promjenu jačine magnetskog polja.

5.4 Magnetsko polje broda

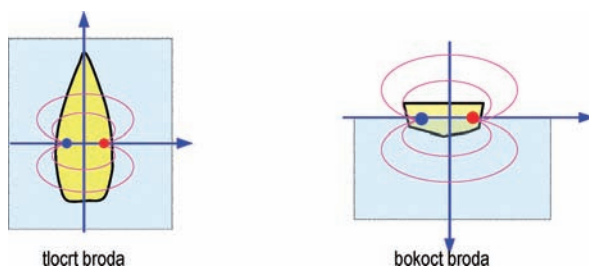
Magnetskim poljem broda naziva se ukupno magnetsko polje, koje je nastalo indukcijom Zemljina magnetskog polja, a ono se sastoji od:

- *stalnoga* brodskog magnetizma i
- *promjenjivoga* brodskog magnetizma.

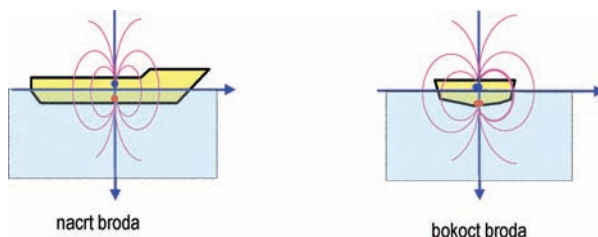
Pritom se može smatrati kao da je magnetsko polje broda sastavljeno od uzdužnog, poprečnog i vertikalnoga magneta. Na slikama 5.3, 5.4 i 5.5 prikazane su silnice magnetskog polja koje nastaju u tim štapovima. (Detaljnije o silama magnetskog polja u mekom željezu može se naći u (Benković i dr. 1986)).



Slika 5.3. Silnice promjenjivoga uzdužnog brodskog magnetizma.



Slika 5.4. Silnice promjenjivoga poprečnog brodskog magnetizma.



Slika 5.5. Silnice vertikalnoga promjenjivog brodskog magnetizma.

5.5 Devijacija magnetskoga kompasa na brodu

Kut između magnetskog meridijana i kompasnog meridijana na mjestu kompasa na brodu naziva se *devijacijom magnetskoga kompasa*. Nautičkim rječnikom rečeno, to je pogreška uzrokovana željeznom konstrukcijom zbog feromagnetičnog materijala broda.

Kako bi mjerenje i određivanje smjera kompasom bilo bolje i pouzdanije, poželjno je da devijacija magnetskoga kompasa bude što manja.

Postupci kojima se ti zahtjevi ostvaruju nazivaju se *kompencacija magnetskoga kompasa*.

5.6 Kompencacija brodskoga magnetskoga kompasa

Svako magnetsko polje broda načelno se kompenzira magnetskim poljem, istoga djelovanja po jačini, ali suprotnog smjera.

Kompencacija *stalnoga brodskog magnetizma* može se ostvariti s pomoću stalnih (permanentnih) magneta, koji se postavje ispod magnetske igle sa suprotno razmještenim polovima. Pritom:

- za poništenje uzdužne komponente stalnoga brodskog magnetizma stalni magnet se postavlja *uzduž* broda,
- za poništenje poprečne komponente stalnoga brodskog magnetizma stalni magnet se postavlja *poprijeko* na brod,
- za poništenje utjecaja nagiba broda služi *nagibni korektor*, koji kompenzira vertikalnu komponentu stalnoga brodskog magnetizma (odnosno nagibne pogreške).

Kompencacija *promjenjivoga brodskog magnetizma* može se ostvariti s pomoću mekog željeza koje postaje magnetično pod utjecajem Zemljina magnetskog polja, kao i brodsko meko željezo, jer magnetske silnice prolaze kroz željezo broda.

Za tu namjenu služe *D-korektori* načinjeni od mekog željeza, koji kompenziraju magnetizam mekog željeza izazvan u uzdužnom i poprečnom horizontalnom željezu, te dio nagibne greške izazvane određenim parametrom.

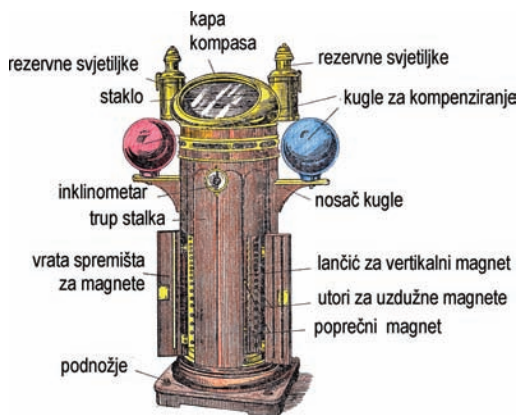
Osim toga s pomoću *flinderove motke* (meko vertikalno željezo) kompenzira se dio promjenjivoga brodskog magnetizma koji je izazvan u vertikalnom nesimetričnom željezu.

Kompencaciju je moguće izvesti:

- metodom poznatih koeficijenata,
- metodom nepoznatih koeficijenata,
- s pomoću deflektora i
- metodom u jednom kursu.

Nakon kompenzacije mora se odrediti devijacija brodskoga kompasa i sastaviti tablica njegovih devijacije za svakih 10o kursa broda (Benković i dr. 1986).

Iz izloženoga se vidi da je kompenzacija brodskoga magnetskoga kompasa složen proces i mora se često izvoditi.



Slika 5.6. Pomorski magnetski kompas sa stalkom i kompenzatorima (prema Tehn. encikl. 1966, sv. 2, str. 314).

Devijacija magnetskoga kompasa nije stalna veličina, već se mijenja u ovisnosti o djelovanju različitih uzroka na brodsko željezo. Zato se devijacija magnetskoga kompasa mora kontrolirati u svakom novom kursu broda, a barem jednom tijekom straže, ako brod plovi u istom smjeru.

6. Osnovni princip rada magnetskih senzora – elektroničkih magnetskih kompasa: magnetski otpor i Hallov efekt

Klasični magnetski kompas za određivanje smjera prema sjeveru ne može se upotrebljavati u automobilima, koji se kreću i stalno potresaju. Zato su se u automobile počeli ugrađivati elektronički kompasi, koji se još nazivaju digitalni kompasi. Naime, iz njih se mogu odmah dobiti podaci u digitalnom obliku, koji su potrebni za daljnju obradu.

To se može ostvariti s pomoću *magnetskog otpora* ili s pomoću *Hallova efekta*.

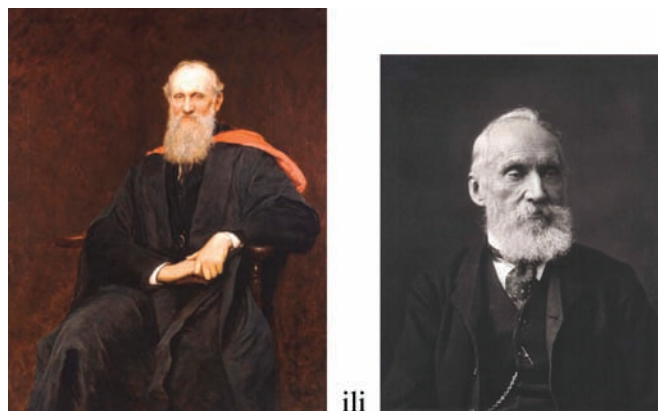
6.1 Magnetski otpor⁶

William Thomson (URL 10) (poznatiji kao Lord Kelvin, 1824. – 1907.) otkrio je 1856. godine da električni otpor u vodičima i poluvodičima ovisi:

*o kutu između smjera električne struje i orijentacije
Zemljina magnetskog polja.*

Zato se taj efekt može uz mjerenje promjene električnog otpora koristiti za izradu elektroničkih kompasa.

⁶ Magnetski otpor je otpor koji magnetsko polje pruža električnoj struji.



Slika 6.1. *William Thomson, poznatiji kao Lord Kelvin (1824. – 1907.), irski fizičar po kojem je jedinica apsolutne temperature nazvana kelvin (URL 9).*

Magnetsko-otporni senzori (engl. magnetoresistive, MR) koriste efekt magnetske otpornosti tako da feromagnetska traka (engl. *permalloy* sastavljen od 19% Fe i 81% Ni) kroz koju teče električna struja mijenja električki otpor u ovisnosti o vanjskom Zemljinom magnetskom polju i njegovoj usmjerenosti, tj. kutu α (Stork 2000). Ta promjena električnog otpora R u ovisnosti o Zemljinu magnetskom polju e mijenjat će se po jednadžbi:

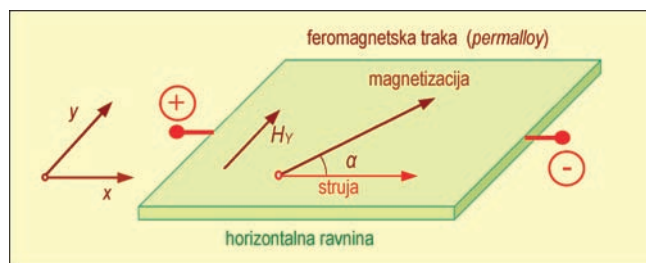
$$R = R_0 + \Delta R \cos^2 \alpha, \quad (1)$$

gdje su: R_0 i ΔR – parametri ovisni o materijalu, α – kut u horizontalnoj ravnini između jačine struje I i horizontalne komponente jačine Zemljina magnetskog polja, $\Delta R = R_{\max} - R_{\min}$, R_{\max} je kada je $\alpha = 0^\circ$, a R_{\min} kada je $\alpha = 90^\circ$, tj. tada je to R_0 .

U prosječno jakom Zemljinu magnetskom polju za feromagnetsku traku (*permalloy*) ΔR je u području od 2 do 3% od R_0 .

Kao što se vidi iz jednadžbe (1) otpor je magnetskog polja nelinearan.

Mjerenje u Wheatstonovu mostu s tipom senzora *magnetskog otpora* svodi se konačno na mjerenje promjene napona V , a ne na mjerenje promjene otpora ΔR .

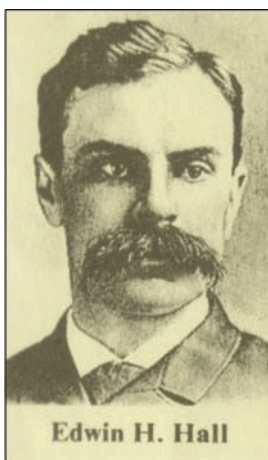


Slika 6.2. *Efekt magnetskog otpora u feromagnetskoj traci (H_Y – komponenta horizontalne projekcije jačine Zemljina magnetskog polja).*

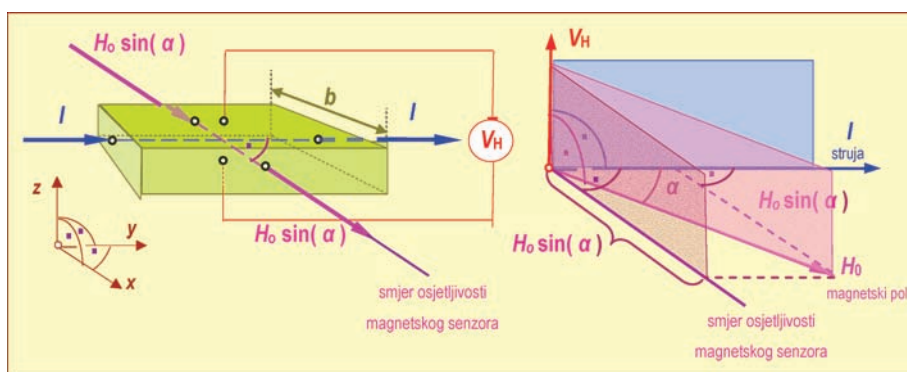
6.2 Hallov efekt

Američki znanstvenik Edwin Herbert Hall (1855. – 1938.) (sl. 6.3) (O. encikl. 1977, sv. 3, str. 335) i (URL 4), radeći na svojoj doktorskoj disertaciji 1879. godine, pronašao je efekt da se zbog utjecaja Zemljina magnetskog polja u vodiču ili poluvodiču kojim teče struja pojavljuje razlika napona na gornjoj i donjoj strani (sl. 6.4).

Do te pojave dolazi kada kroz horizontalno položen vodič teče struja jačine I u smjeru njegove osi y , a okomito na taj smjer, tj. u smjeru osi x djeluje horizontalna projekcija komponente jačine Zemljina magnetskog polja $H_0 \cos(\alpha)$. Tada se okomito na ta dva smjera, dakle u smjeru osi Z pojavljuje napon V_H . On je po svom pronalazaču nazvan Hallov napon (Varičak 1964). To je još izraženije kada kroz poluvodič teče struja jačine I .



Slika 6.3. Amerikanac Edwin Herbert Hall (1855. – 1938.) pronašao je 1879. godine efekt, nazvan po njemu Hallov efekt (URL 4).



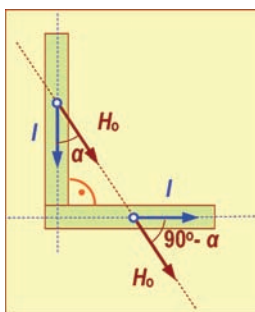
Slika 6.4. Princip nastanka Hallova efekta.

Napon V_H koji se dobije zbog Hallova efekta može se izraziti jednadžbom:

$$V_H = \frac{R_H \cdot I}{b} \cdot H_0 \cdot \sin \alpha, \quad (2)$$

gdje su: R_H – Hallova konstanta (poznata), b – širina uzorka poluvodiča (poznata), I – jakost struje (mjeri se ampermetrom), H_0 – horizontalna komponenta Zemljina magnetskog polja i α – kut u horizontalnoj ravnini između magnetskog meridijana i smjera u kojem je usmjerena struja.

Budući da se napon V_H može izmjeriti voltmetrom, to znači da su u prethodnoj jednadžbi (2) dvije nepoznanice: H_0 i α . Zato se samo s jednim magnetskim senzorom izrađenim iz poluvodiča koristeći Hallov efekt ne mogu odrediti obadvije nepoznanice. To je razlog da se u elektroničkim ili, kako se još nazivaju, digitalnim kompasima moraju postaviti najmanje dva magnetska senzora. Oni se postavljaju okomito jedan na drugi te se dobiju dvije jednadžbe (2), u kojima su iste nepoznanice H_0 i α . Pritom se može naglasiti da je u drugom senzoru kut jednak ($90^\circ - \alpha$) (sl. 6.5), a to znači da je to zapravo ista nepoznanica α .



Slika 6.5. Dva okomito postavljena magnetska senzora u kojima se kutovi između jakosti struje I i horizontalne komponente magnetskog polja H_0 razlikuju za 90° .

Za određivanje kuta magnetske inklinacije “ i ” bilo bi potrebno postaviti i treći magnetski senzor okomit na dva prethodna.

6.3 Pojašnjenje nastanka Hallova efekta

Hallov efekt može se objasniti Lorentzovom silom (Bebek, Marković, Tomaš 1982), tj. djelovanjem magnetskog polja na nositelje električnog naboja, koji se kreću. Lorentzova sila izražena je s pomoću vektorskog produkta jednadžbom:

$$\mathbf{F} = e \cdot \mu \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{H}_0 \quad (3)$$

gdje su:

\mathbf{F} – vektor Lorentzove sile koja djeluje na električni naboj,

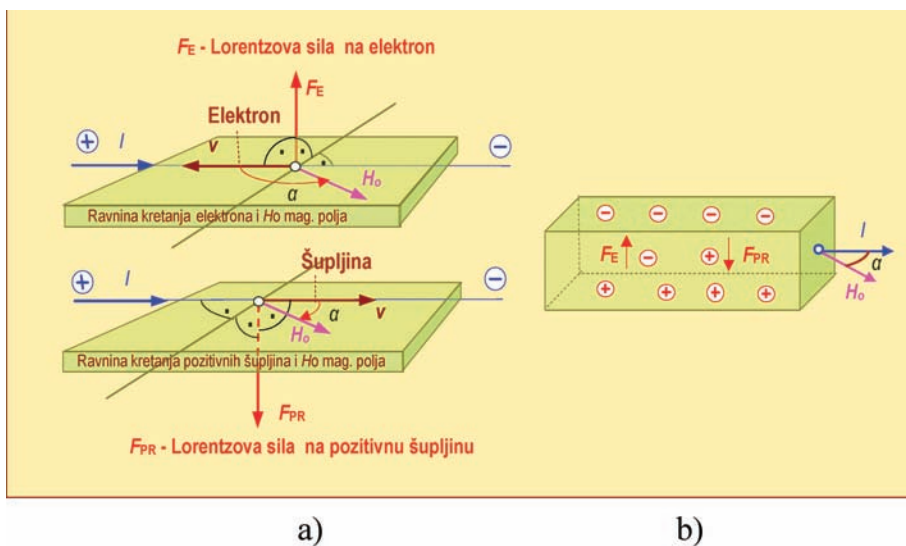
e – električni naboj s predznakom “+” ili “-”,

- μ – koeficijent permeabilnosti,
 \mathbf{v} – vektor brzine gibanja električnog naboja,
 \times – vektorski produkt,

\mathbf{H}_0 – vektor horizontalne komponente jačine magnetskog polja.

Iz toga vektorskog produkta slijedi da vektor Lorentzove sile \mathbf{F} leži na pravcu koji je okomit na ravninu u kojoj leži vektor brzine \mathbf{v} i vektor \mathbf{H}_0 , a njezin smjer određuje se po *pravilu desnog vijka*, koje glase:

- ravnina vektora brzine električnog naboja i vektora horizontalne komponente jačine magnetskog polja gleda se s gornje strane (sl. 6.6 a),
- kada se prvi vektor (\mathbf{v}) rotira najkraćim putem u drugi vektor (\mathbf{H}_0) u smislu suprotnom od gibanja kazaljke na satu treći vektor (\mathbf{F}), tj. Lorentzova sila bit će usmjerena prema gore (prema nama) i
- kada se prvi vektor (\mathbf{v}) rotira najkraćim putem u drugi vektor (\mathbf{H}_0) u smislu gibanja kazaljke na satu, treći vektor (\mathbf{F}), tj. Lorentzova sila bit će usmjerena prema dolje (od nas).



Slika 6.6. *Prostorni prikaz vektora Lorentzovih sila koje djeluje na elektrone i pozitivne šupljine (rupe) u poluvodiču.*

Dogovoreni je pozitivan smjer struje kada struja ide od plus prema minus polu. Poznato je da se struja sastoji od:

- elektrona (s negativnim nabojem), koji se kreću od negativnoga prema pozitivnom polu izvora i
- pozitivnih šupljina (rupa) (s pozitivnim nabojem, koje se kreću od pozitivnoga prema negativnom polu izvora).

Zato se u magnetskom polju pri protjecanju struje pojavljuju Lorentzove sile koje otklanjaju negativne elektrone na jednu stranu vodiča, a pozitivne šupljine na drugu stranu (sl. 6.6 a i b).

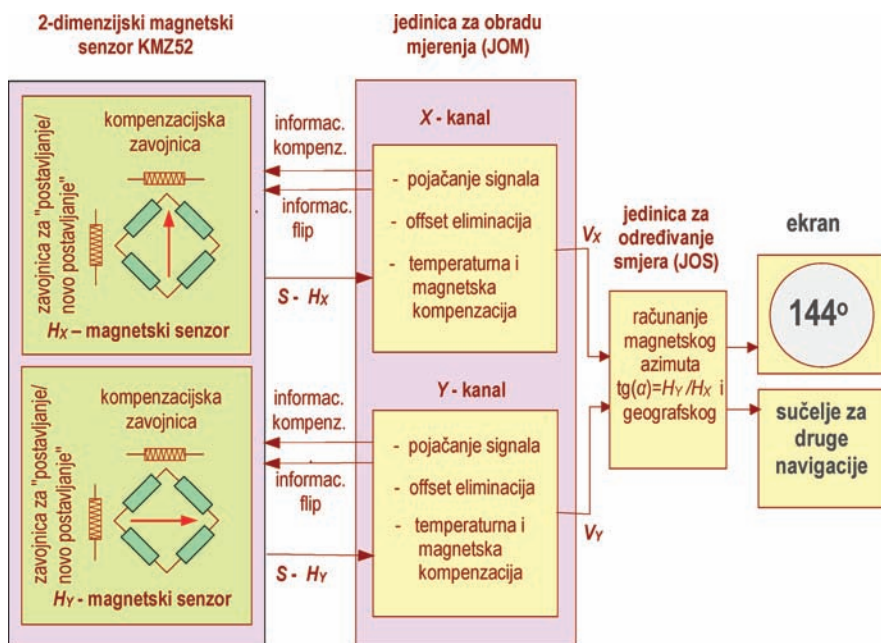
To je razlog da se na pobočnim graničnim plohama javlja Hallov napon V_H . Naime, pozitivni i negativni naboji otklanjaju se na suprotne strane, što izaziva promjene u magnetskim senzorima.

6.4 Princip djelovanja elektroničkoga kompasa

Za elektroničke kompase koristi se još izraz digitalni kompas, a oni mogu koristiti magnetske senzore, koji rade na principu magnetskog otpora ili Hallova efekta.

Princip rada elektroničkoga kompasa može se pojasniti na funkcijskom blok-dijagramu Philipsova elektroničkoga kompasa s dvodimenzijskim magnetskim senzorom KMZ52 (sl. 6.7), gdje se koristi efekt magnetskog otpora (Stork 2000) i (URL 1). Philipsov dvodimenzijski magnetski senzor KMZ52 mjeri slabo magnetsko polje Zemlje i ima dva magnetska senzora H_x i H_y , koji su položeni u horizontalnoj ravnini, i to okomito jedan na drugi, tj. pod kutom od 90° .

Svaki magnetski senzor (H_x i H_y) ima po četiri magnetske trake spojene u *Wheatstonov most* te se tako postiže vrlo velika osjetljivost na slabo magnetsko polje



Slika 6.7. Funkcijski blok-dijagram Philipsova elektroničkoga kompasa s dvodimenzijskim magnetskim senzorom KMZ502, gdje su senzori H_x i H_y postavljeni pod pravim kutom (prema Stork 2000).

Zemlje. Osim toga svaki magnetski senzor ima zavojnicu *postavi/ponovno postavi* (engleski *set/reset*) i zavojnicu za *kompencaciju*.

Magnetski otporni senzori po prirodi su bi-stabilni (engleski flip-flop), tj. smjer njihova unutarnjega magnetiziranja može se lako promijeniti (engleski *flip* – lak udarac, lako udariti). Naime, može se dogoditi da se magnetski otporan element zbog jačega magnetskog polja polarizira u smjeru toga polja i da zbog toga dođe do pogreške. U prvobitno stanje vraća se zavojnicom za *postavljanje/ponovno postavljanje*. To se može postići s pomoću dovoljno snažnoga magnetskog polja, ako se primijeni paralelno polje, ali suprotnog smjera. “Flipping” uzrokuje inverziju karakteristika senzora, tako da senzor na izlazu mijenja polaritet.

Zavojnica za *postavljanje/ponovno postavljanje* (engleski – *set/reset*) smještena pokraj senzora prouzrokuje pomoćno magnetsko polje za promjenu stanja magnetski otpornih senzora, tj. za eliminaciju, kako kažu Englezi, *offseta*.

Kompencacijska zavojnica u točnijih elektroničkih kompasa omogućava:

- kompencaciju odstupanja u rezultatu mjerenja, koja je uzrokovana promjenom temperature i
- kompencaciju djelovanja interferirajućih poremećajnih magnetskih polja izazvanih magnetskom indukcijom Zemljina magnetskog polja u fizičkom tijelu automobila.

Kompencacijska zavojnica može ostvariti te obadvije funkcije s pomoću generiranja magnetskog polja u smjeru osjetljivosti, ali suprotno usmjerenim, u zavojnici ugrađenoj pokraj elementa svakog magnetskog senzora.

Tehnički je vrlo teško ostvariti potpunu okomitost između magnetskih senzora H_x i H_y . Zato se ta netočnost u točnijih elektroničkih kompasa mora računski korigirati. Naime, pogreška u njihovoj neokomitosti u kutu od samo 2° izaziva periodičku pogrešku magnetskog azimuta tako da je maksimalna pogreška magnetskog azimuta 2° .

Svrha je bloka tzv. jedinice za obradu mjerenja (JOM) da prenese napone jedinici za određivanje smjera kretanja, tj. magnetskog azimuta i geografskog azimuta. Ti su naponi proporcionalni veličinama projekcija horizontalne komponente Zemljina magnetskog polja na osi x i y (H_x i H_y) u točki mjerenja. Pritom se odaslani signali s magnetskih senzora moraju pojačati.

Osim toga ta jedinica za obradu mjerenja odašilje potrebne informacije zavojnicama za kompenziranje odstupanja uzrokovanih promjenom temperature i interferirajućih magnetskih polja izazvanih interferencijom m Zemljina magnetskog polja u fizičkom tijelu automobila. To je najznačajnija jedinica magnetskog senzora KMZ52.

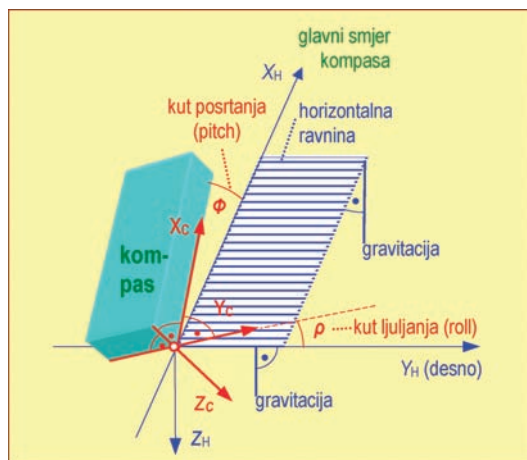
Treba naglasiti da bi teorijski bilo dovoljno u automobile ugraditi dvodimenzijske magnetske senzore da se odredi magnetski azimut. Međutim, u automobile se ugrađuje trodimenzijski senzor sastavljen od dvodimenzijskog i jednog jednodimenzijskoga magnetskog senzora, koji je okomit na dvodimenzijski. Naime, na taj se način može ukloniti, još uz dodatne informacije, utjecaj nehorizontalnosti elektroničkoga kompasa.

7. Utjecaj nehorizontalnosti magnetskog senzora, tj. pogreške njegova nagiba

Pri objašnjenju rada magnetskih senzora uvijek se naglašavalo da se on postavlja u horizontalni položaj. Međutim, automobil tijekom vožnje može biti nagnut ovisno o nagibu ceste, ali i potresanju, pa magnetski senzor u automobilu može zauzeti različit položaj od horizontalnog. To će biti i najčešći slučaj.

Zbog toga se nekoć na brodovima kompas stavljalo u tekućinu, koja je osigurala njegovo postavljanje u horizontalni položaj pod utjecajem gravitacije. Poslije su kompas postavljeni u kardanski ovjes što je bilo još bolje rješenje. Taj način pomorci su nazvali po engleskom izrazu *mechanical gimbaling*. Međutim, danas se u automobilima koristi tzv. *electronical gimbaling*, gdje se pogreška nagiba kompasa kompenzira bez njegova fizičkog pomicanja. To se ostvaruje mjerenjem komponente jačine (koordinate) Zemljina magnetskog polja x_C , y_C i z_C s trodimenzij-skim magnetskim sensorom i sensorima (elektroničkim libelama) koji određuju kutove zakreta:

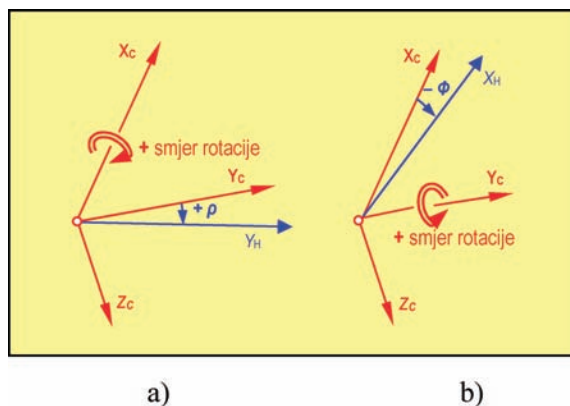
- Φ – posrtanja (engleski *pitch*) (rotacija oko osi y_C) i
- ρ – ljuljanja (engleski *roll*) (rotacija oko osi x_C) (sl. 7.1).



Slika 7.1. Definicija posrtanja (zakreta oko poprečne osi y_C – engleski *pitch*) i ljuljanja (zakreta oko uzdužne osi x_C – engleski *roll*).

Te izmjerene veličine omogućuju da se računskim putem izračunaju popravljene vrijednosti magnetskog polja i da se tako može izračunati prava vrijednost magnetskog azimuta $\alpha_{mag.azimut}$ u horizontalnoj ravnini.

Ovdje je riječ o rotacijama oko osi x_C za kut rotacije roll $+\rho$ i oko osi y_H za kut pitch $-\Phi$ (sl. 7.2).



Slika 7.2. Grafički prikaz predznaka rotacija: a) uslijed rotacije za kut ljuljanja "+ρ" i b) uslijed rotacije za kut posrtaanja "-Φ".

Tako se mogu uz primjenu matrica rotacija $R_2(-\Phi)$ i $R_1(\rho)$ izračunati horizontalne koordinate x_H , y_H i z_H vektora jačine magnetskog polja iz izmjerenih koordinata vektora jačine magnetskog polja:

$$\begin{bmatrix} x_H \\ y_H \\ z_H \end{bmatrix} = R_2(-\Phi) \cdot R_1(\rho) \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Phi & 0 & \sin \Phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \Phi & 0 & \cos \Phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \rho & \sin \rho \\ 0 & -\sin \rho & \cos \rho \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{bmatrix}, \quad (4)$$

te se dobije da je:

$$\begin{bmatrix} x_H \\ y_H \\ z_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_C \cos \Phi - y_C \sin \rho \sin \Phi + z_C \cos \rho \sin \Phi \\ y_C \cos \rho + z_C \sin \rho \\ -x_C \sin \Phi - y_C \sin \rho \cos \Phi + z_C \cos \rho \cos \Phi \end{bmatrix}, \quad (5)$$

Potom se može izračunati i kut magnetskog azimuta u horizontalnoj ravnini iz jednadžbe:

$$\alpha_{mag. azimut} = \arctan \left(\frac{y_H}{x_H} \right) = \frac{y_C \cos \rho + z_C \sin \rho}{x_C \cos \Phi - y_C \sin \rho \sin \Phi + z_C \cos \rho \cos \Phi}, \quad (6)$$

gdje su x_H i y_H – izračunane koordinate usmjerenosti magnetskog polja u horizontalnoj ravnini, a koje su određene iz matrice (5).

Kada se ne bi koristili senzori za mjerenje kutova nagiba magnetskog senzora pojavila bi se odstupanja koja bi bila veća kod većih nagiba magnetskih senzora. Međutim, valja naglasiti da odstupanja ovise i o kutu magnetske inklinacije na mjestu mjerenja, koja su veća na mjestima s većim kutom inklinacije "i".

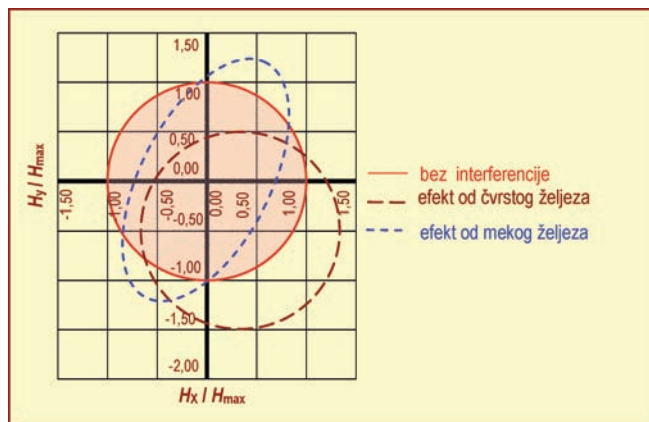
8. Utjecaj automobila na elektronički kompas

Automobili su izrađeni od različitih vrsta željeza, ostalih vrsta feromagnetičnih i neferomagnetičnih metala, plastike i dr. U njima ima sigurno manje željeza i feromagnetičnih metala nego u brodu, ali unatoč tome svakako treba uzeti u obzir i poremećaj izazvan magnetskom indukcijom, koji je izazvan Zemljinim geomagnetskim poljem.

Kut između magnetskog meridijana i kompasnog meridijana na mjestu kompasa u automobilu naziva se *devijacijom magnetskoga kompasa*, koja je nastala zbog utjecaja konstrukcije automobila. Kako bi kompas bio bolji i pouzdaniji, poželjno je da devijacijska sila bude što manja. Postupci kojima se ti zahtjevi ostvaruju naziva se kompenzacija magnetskoga kompasa.

Zato se kompas u automobilu mora kompenzirati za efekt prouzrokovan magnetskom indukcijom u njegovu fizičkom tijelu, koje je izazvano Zemljinim magnetskim poljem. Međutim, odmah treba naglasiti da se efekt prouzrokovan magnetskim poljem nekog drugog automobila, koji prolazi pokraj auta s kompasom, ne može kompenzirati običnim načinom.

Na sl. 8.1 krugom (crvene boje) sa središtem u točki s koordinatama 0,0 i radijusa jednakog veličini H horizontalne komponente Zemljina magnetskog polja prikazan je test-dijagram magnetskog polja Zemlje bez interferencija. Ostali međuutjecaji izazivaju devijaciju od tog oblika.



Slika 8.1. Tipični test-dijagram pokazuje efekt magnetske indukcije od tvrdog i mekog željeza.

Efekt “*tvrdog željeza*” izazvan je magnetiziranim predmetima u automobilu, kao i dijelovima auta izrađenim od tvrdog željeza koji stoje na stalnim udaljenostima od kompasa. Tako će biti izazvano inducirano magnetsko polje u automobilu koje se vektorski pribraja Zemljinu magnetskom polju. U test-dijagramu to magnetsko polje prikazano je kružnicom (smeđe boje) s pomaknutim središtem.

Efekt “*mekog željeza*” uzrokovan je magnetskom indukcijom u mekom željezu te izaziva distorziju Zemljina magnetskog polja. Taj efekt ovisi o kutu usmjerenosti

kompassa, a na dijagramu je prikazan elipsom (plave boje). U praksi je efekt “tvrđog željeza” znatno veći od efekta “mekog željeza”.

Kako bi se minimalizirao efekt “tvrđog željeza”, kompas se ne smije instalirati blizu predmeta koji imaju jako magnetsko polje, npr. u blizini zvučnika i dr.

Kompenzacija magnetskog polja “tvrđog željeza” i “mekog željeza” sastoji se u tome da se pomaknuta i deformirana magnetska polja u test-dijagramu pretvore u krug sa središtem u točki s koordinatama 0,0. Drugim riječima da se inducirana magnetska polja svedu u ishodišnu točku s koordinatama 0,0. To će se ostvariti kalibracijom za svaki automobil i svaki kompas posebno, a preporuča se da se kalibracija ponovno izvede ako dođe do neke promjene na automobilu.

Efekt “mekog željeza” obično je mnogo manji, pa se jednostavnija kalibracija može realizirati s pomoću “bidirekcijske kalibracije”.

Efekti od poremećajnih magnetskih polja proizvedenih indukcijom, tj. njihovih horizontalnih komponenti, mogu se kompenzirati generirajući suprotne komponente magnetskog polja u odgovarajućim zavojnicama magnetskih senzora kojima je odaslana odgovarajuća struja. Na taj način poništava se neželjeno djelovanje poremećajnih magnetskih polja stvorenih u tijelu automobila. Kompenzacija se može izvesti i korištenjem mikrokontrolera odbijajući komponente poremećajnih magnetskih polja iz odgovarajućih senzorskih izlaznih signala.

9. Integracija GPS-navigacije s elektroničkim kompasom i brojačem okreta kotača – autonavigacija

Pri kinematičkome modu rada s GPS-prijamnicima koji se pomiču, potrebno je istovremeno primati signale s najmanje 4 GPS-satelita. Ako taj uvjet nije ispunjen, ne mogu se GPS-prijamnikom odrediti koordinate GPS-antene, tj. automobila u kojem je smješten GPS-prijamnik. To se događa na primjer i u tunelima, visokim usjecima i uskim gradskim ulicama. Kako bi se uklonio taj nedostatak, u automobile s GPS-navigacijom (sl. 9.1.a) ugrađuju se:

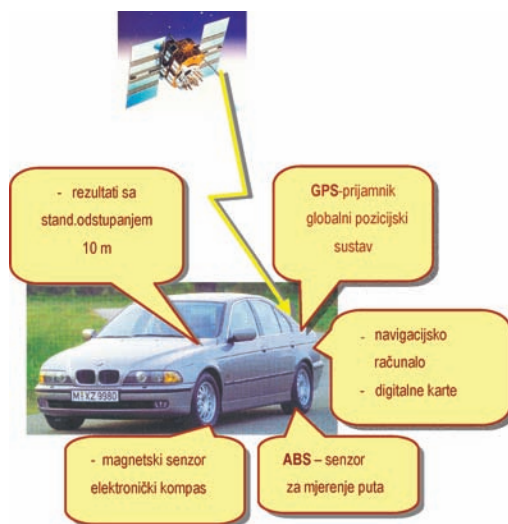


a)



b)

Slika 9.1. a) GPS-navigacija u automobilu BMW 7 Series i BMW 8 Series coupés. Na ekranu je prikazana digitalna karta i položaj automobila (BMW-prospekt), b) Magnetski senzor za BMW Navigationssystem 5er/7er, koji je proizveo Philips (URL 8).



Slika 9.2. Automobil i ugradnja senzora za autonavigaciju (prema BMW-1996).

- elektronički kompas za određivanje azimuta kretanja i
- brojač okreta kotača za određivanje duljine prijeđenog puta.

To je jednostavnije, tj. jeftinije rješenje, iako postoje i druga, skuplja rješenja, na primjer inercijski navigacijski sustavi ili žiroskopski kompas i dr.

U trenucima kada nema dovoljno signala s GPS-satelita, koordinate položaja automobila treba odrediti iz mjerenja:

- magnetskog azimuta α_{mag} s pomoću elektroničkoga kompasa i
- prijeđene udaljenosti d automobila mjerene s pomoću broja okretaja kotača (ABS⁷-senzor).

Tada se koordinate položaja automobila mogu odrediti ovako:

- Iz GPS-mjerenja kada su bili primani posljednji signali s dovoljnog broja GPS-satelita, tj. neposredno prije prekida prijama GPS-signalu s dovoljnog broja GPS-satelita izračunaju se koordinate položaja automobila:

$$x_{\text{GPS-A}} \text{ i } y_{\text{GPS-A}}$$

Ovdje su koordinate automobila $x_{\text{GPS-A}}$ i $y_{\text{GPS-A}}$ izražene u ravnini projekcije digitalne karte. One su izračunane transformacijom iz prostornih (trodimenzij-skih) geocentričkih koordinata određenih GPS-navigacijom, izraženih u koordinatnom sustavu WGS' 84.

⁷ ABS-sustav (Anti-Lock Braking System) da se čak i prilikom kočenja dalje može upravljati vozilom, pri čemu se kontroliranim stezanjem i otpuštanjem diska ne dopušta kočnicama da zablokiraju, te se može izbjeći opasnost (Metro 1.11.2007, str. 18 "Sustavi koji sigurnost znače"). Međutim, ABS – senzori služe i za određivanje broja okretaja kotača.

- Izračuna se razlika kutova:

$$\delta = \alpha_{\text{GPS}} - \alpha_{\text{mag}}$$

gdje je α_{GPS} – azimut kretanja automobila određen iz GPS-mjerenja u trenutku kada su još primani signali s dovoljnog broja GPS-satelita, a α_{mag} – magnetski azimut izmjeren elektroničkim kompasom, koji je mjereno u tom istom trenutku kada je bio izmjeren i GPS-azimut. Izračunana razlika kutova δ predstavlja magnetsku deklinaciju.

- Registrira se magnetski azimut $\alpha_{\text{mag-}i}$ i prijedeni put d_i svake sekunde “ i ”. Prijedeni put u jednoj sekundi odredi se iz jednadžbe:

$$d_i = 2 r \pi k_i,$$

gdje je r – radijus kotača, k_i – broj okretaja kotača u jednoj sekundi, a indeks “ i ” označava sekundu nakon početka računanja položaja automobila s pomoću elektroničkoga kompasa i broja okretaja kotača u jednoj sekundi. Tako indeks “ i ” poprima vrijednosti $i = 1, 2, 3, \dots, n$, gdje je “ n ” sekunda nakon početka računanja položaja automobila s pomoću elektroničkoga kompasa i broja okretaja kotača u jednoj sekundi.

- Izračunaju se koordinatne razlike promjene položaja automobila za svaku sekundu po jednadžbama:

$$\Delta x_i = d_i \cos(\alpha_i + \delta) \quad \text{i} \quad \Delta y_i = d_i \sin(\alpha_i + \delta).$$

- Koordinate položaja automobila u bilo kojoj sekundi “ n ” dobit će se dodavanjem koordinatama određenim GPS-mjerenjem plus zbroj svih tih vrijednosti Δx_i i Δy_i sve do onog trenutka “ n ” kada se žele znati koordinate položaja automobila, te će biti:

$$x_{\text{auta-}n} = x_{\text{GPS-A}} + \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad \text{i} \quad y_{\text{auta-}n} = y_{\text{GPS-A}} + \sum_{i=1}^n \Delta y_i.$$

Na osnovi formula može se izračunati položaj automobila u onim trenucima kada GPS-prijamnik ne prima signale s dovoljnog broja GPS-satelita.

Pritom će točnost određivanja koordinata ovisiti:

- o točnosti mjerenja magnetskog azimuta, što znatno ovisi i o geomagnetskim poremećajima,
- o točnosti mjerenja prijedene udaljenosti mjerenjem broja okretaja kotača i točnosti radijusa kotača, tj. o tlaku zraka u gumama kotača,
- o dužini vremena bez primanja signala s dovoljnog broja GPS-signala.

U raznim tvrtkama na različite načine riješeno je pitanje integracije GPS-a, elektroničkoga kompasa i broja okretaja kotača automobila.

10. Zaključak

Pronalazak magnetskoga kompasa odigrao je u povijesti značajnu ulogu za razvoj pomorstva i općenito civilizacije u svijetu. Primjena magnetskog kompasa u geodeziji bila je velika, te je tako dala doprinos razvoju geodezije. Danas je primjena magnetskoga kompasa izgubila svoj prvobitni značaj, ali integracija elektroničkoga kompasa sa suvremenom satelitskom GPS-navigacijom daje neka nova ekonomska rješenja. Osim toga predviđaju se konstrukcije novih praktičnih geodetskih pomagala, koja će koristiti magnetske kompase.

Zahvala: Najljepše zahvaljujemo kolegama prof. dr. Asimu Bilajbegoviću i prof. dr. Radovanu Marjanoviću Kavanaghu na korisnim primjedbama, kojima su pridonijeli boljoj kvaliteti ovog istraživanja primjene magnetskih kompasa u prošlosti i danas u integraciji elektroničkih kompasa s GPS-prijamnicima u vozilima.

Zahvaljujemo također Ministarstvu znanosti, obrazovanja i športa RH, što je djelomično financiralo ovaj rad, koji je izrađen u okviru projekta “*Razvoj znanstvenog mjeriteljskog laboratorija za geodetske instrumente*” br.: 007-000000-3539.

Literatura

- Bek, B., Marković, B., Tomaš, L. (1982): Fizika 2 (elektricitet, optika, fizika atoma), Školska knjiga, Zagreb.
- Benković, F., Piškorec, M., Lako, Lj., Čepelak, K., Stajić, D. (1986): Terestrička i elektronska navigacija, Hidrografski institut ratne mornarice – Split.
- BMW (prospekt): Special equipment for the BMW 7 Series and BMW 8 Series coupés, prospekt.
- BMW (1996): Navigationssystem CARIN, prospekt, BMW AG, AK-4.
- De Bono, E. (2005): Povijest izuma – od kotača do računala, Marijan tisak, Split.
- Horning, F., Wagner, W. (2005): Duell der Giganten, Der Spiegel, Nr. 32, str. 78.
- Krešić, H. (2008): Guardian: Tko je izmislio teleskop?, Novi list, Znanost i obrazovanje, 21. 09. 2008., str. 4.
- O. encikl. (1977): Edwin Herbert Hall, Opća enciklopedija jugoslavenskog leksikografskog zavoda Miroslava Krleža, sv. 3, str. 335.
- O. encikl. (1978): Kompas, Opća enciklopedija jugoslavenskog leksikografskog zavoda Miroslava Krleža, sv. 4, str. 476.
- O. encikl. (1979): Magnetizam i magnetizam Zemlje, Opća enciklopedija jugoslavenskog leksikografskog zavoda Miroslava Krleža, sv. 5, str. 245.
- Macarol, S. (1977): Praktična geodezija, Tehnička knjiga, Zagreb.
- Retscher, G., Koppensteiner, J. M. (1996): Die Rolle von GPS in europäischen Autonavigationssystemen, Vermessungswesen und Raumordnung VR 58/2, str. 186–197.

- Solarić, M., Solarić, N. (2008): Povijesni pregled širenja znanja o geomagnetizmu i njegovim promjenama, Geodetski list br. 4, str. 211–233.
- Stork, Th. (2000): Electronic Compass Design using KMZ 51 and KMZ52 – Application Note AN00022, Philips Semiconductors, Philips.
- Tehn. encikl. (1966): Brod, Jugoslavenski leksikografski zavod, sv. 2, Zagreb.
- Varičak, M. (1964): Poluprovodnici i njihova primjena u nauci i tehnici, Zavod za izdavanje udžbenika, str. 75., Beograd.
- URL 1: Elektronski kompas z uporabo senzora KMZ52,
www.ro.feri.uni-mb.si/predmeti/seminar_2/porocila/por06/Sandi.doc, (6.6.2007.).
- URL 2: History of Chinese Invention – Invention of the Magnetic Compass,
<http://www.computersmiths.com/chineseinvention/compass.htm>, (8.6.2007.).
- URL 3: The magnetic compass – history,
<http://www.solarnavigator.net/compass.htm>, (8.6.2007.).
- URL 4: Edwin Hall,
http://en.wikipedia.org/wiki/Edwin_Hall, (4.6.2007.).
- URL 5: Peter of Maricourt,
http://en.wikipedia.org/wiki/Peterus_Peregrinus, (4.6.2007.).
- URL 6: Thomas Jefferson's Theodolite,
http://celebrating200years.noaa.gov/theodolites/theodolitehead_zm.html, (12.8.2007.).
- URL 7: Theodolite,
<http://www.landsurveyinghistory.ab.ca/Equipment/Theodolite.htm>, (12.8.2007.).
- URL 8: <http://www.hood.de/auction/29988156/magnetfeldsonde-fuer-bmw-navigationssystem>, (16.10.2007.).
- URL 9: William Thomson, 1st Baron Kelvin,
http://en.wikipedia.org/wiki/William_Thomson%2C_1st_Baron_Kelvin, (1.11.2007.),
http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Hubert_von_Herkomer03.jpg, (26.12.2007.).
- URL 10: Magnetoresistance,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetoresistance>, (1.11.2007.).
- URL 11: Applications of Magnetoresistive Sensors in Navigation Systems,
<http://www.sse.honeywell.com/magnetic/datasheets/sae.pdf>, (23.12.2007.).
- URL 12: Hans Lipperhey,
<http://galileo.rice.edu/sci/lipperhey.html>, (19.11.2008.).

Historical Review of Using Magnetic Compass, Basic Principle of Working Electronic Compass and Car Navigation

ABSTRACT. In the paper is given historical review of expanding knowledge on magnetic compasses and its application in geodesy, mining measurements and nautical navigation. Beside of this described principle of working electronic compass with aid magnetic resistance or Hall's effect. After that influence of magnetic induction caused by geomagnetism in physical body of car is explained. On the end described integration GPS-receiver, electronic compass and counter of revolutions wheel of car in modern car navigation.

Keywords: magnetism, geomagnetism, magnetic declination and inclination, magnetic compass, electronic compass, digital compass, magnetic sensor, influence of ship on compass, magnetic resistance, Hall's effect, influence of car on electronic compass, car navigation.

Prihvaćeno: 2009-05-14