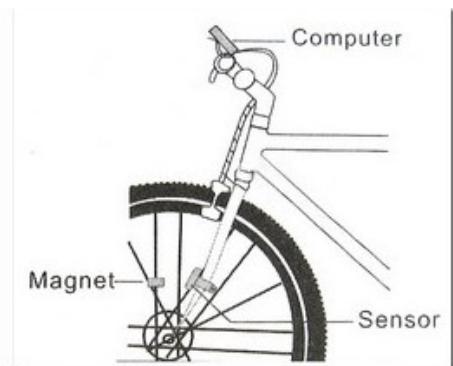


MJERENJE MAGNETSKOG POLJA:

Primjena:

- geologija
- navigacija
- medicina
- mjerni pretvornici



Uređaji za mjerjenje magnetskog polja nazivaju se **magnetometri**.

Magnetometre dijelimo na dvije vrste:

1. Magnetometri za mjerjenje **intenziteta ukupnog magnetskog polja** bez obzira na položaj instrumenta u odnosu na smjer magnetskog polja (*engl. total-field magnetometers*):
 - protonski (nuklearni) magnetometar
 - optički magnetometar
2. **Vektor-magnetometri** (*engl. vector magnetometers*) koji mjere samo komponentu magnetskog polja paralelnu s mjerom osi instrumenta:
 - induksijski magnetometar (*engl. induction coil, search coil*)
 - fluxgate magnetometar
 - Hallova sonda
 - magnetootpornički (*engl. magnetoresistive*)
 - AMR (*engl. anisotropic magnetoresistor*)
 - GMR (*engl. giant magnetoresistor*)
 - SQUID

INDUKCIJSKI MAGNETOMETAR (engl. induction coil, search coil)

Temelji se na zakonu elektromagnetske indukcije:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(\vec{B} \cdot \vec{A})}{dt}$$

Postoje dvije izvedbe:

- a) sa zračnom zavoјnicom (n = broj zavoјa, A = površina zavoјnice): $e = -\mu_0 n A \frac{dH(t)}{dt}$
 - frekvencijsko područje od 100 Hz do nekoliko MHz
 - linearan odnos između induciranih napona i promjene magnetskog polja
 - ako se želi postići velika osjetljivost na niskim frekvencijama,
- b) s jezgrom od mekog feromagnetskog materijala u obliku štapa: $e = -\mu_0 \mu_r n A \frac{dH(t)}{dt}$
 - za istu osjetljivost ima manje dimenzije od zračne zavoјnice
 - nelinearan odnos između induciranih napona i magnetskog polja
 - jezgra unosi dodatni šum

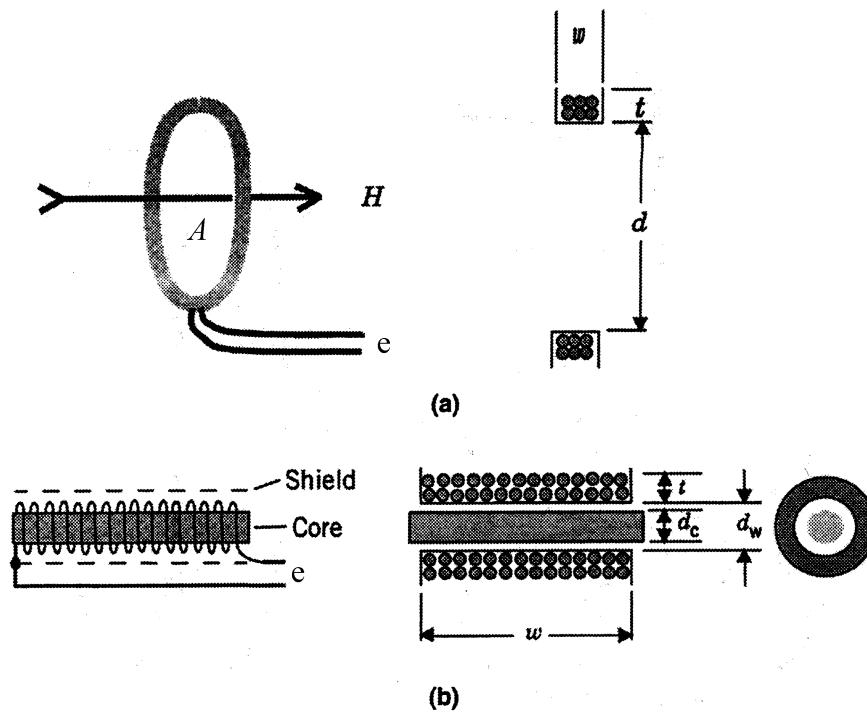


FIGURE 48.4 Induction or search coil sensors consist of a loop of wire (or a solenoid), which may or may not surround a ferromagnetic core. (a) Air core loop antenna; (b) solenoid induction coil antenna with ferromagnetic core.

Pomoću induksijskog magnetometra možemo mjeriti **izmjenično magnetsko polje**. Mjerene **istosmjernog magnetskog polja** moguće je uz rotaciju zavoјnice, tj. promjenom površine A .

$$e = -\mu_0 \mu_r n H \frac{dA(t)}{dt}$$

Podaci o feromagnetskim materijalima koji se koriste za jezgre:

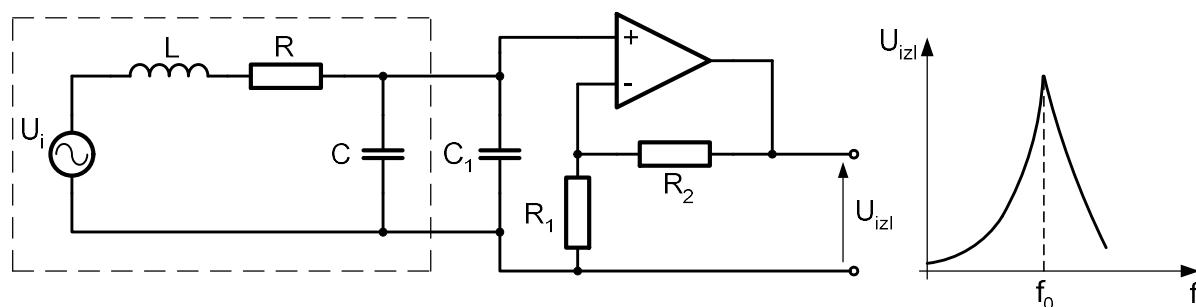
TABLE 48.4 Magnetic Properties of Typical Core Material

Name	Composition	Manufacturer	μ_i	μ_{\max}
Mild steel	0.2 C, 99 Fe		120	2000
Silicon iron	4.0 Si, 96 Fe		500	7000
CN20	Ni-Zn Ferrite	Ceramic Magnetics	800	4500
MN60	Mn-Zn Ferrite	Ceramic Magnetics	5000	10,500
"49" Alloy	48 Ni, 52 Fe	Carpenter	6500	75,000
2605S-2	Fe-based amorphous alloy	Allied-Signal	10,000	600,000
4-79 Permalloy	4 Mn, 79 Ni, 17 Fe	Magnetics	20,000	100,000
Mumetal	5 Cu, 2 Cr, 77 Ni, 16 Fe	Magnetics	20,000	100,000
HyMu "80"	4.2 Mo, 80 Ni, 15 Fe	Carpenter	50,000	200,000
2826MB	NiFe-based amorphous alloy	Allied-Signal	100,000	800,000

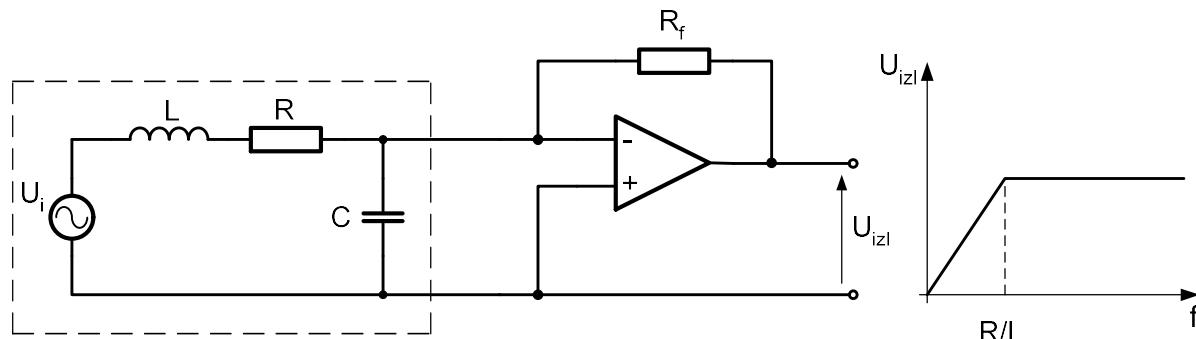
Note: μ_i is the slope of the magnetization curve at the origin. μ_{\max} is the maximum incremental slope of the magnetization curve.

Sklopovi za mjerjenje induciranih napona:

a) Naponsko pojačalo



b) Strujno pojačalo



a) naponski

- izlazni napon ovisi i o jačini magnetskog polja i o frekvenciji pa je ovaj način pogodan je za **uskopojasna** mjerena ili mjerena na točno određenoj frekvenciji

b) strujni

- pogodan je za **širokopojasna** mjerena – od 10 Hz (0.1Hz) do 200 kHz
- smanjena su nelinearna izobličenja – struja kroz zavojnicu stvara magnetsko polje koje se suprotstavlja mjerenu magnetskom polju – ukupni tok kroz zavojnicu je oko nule, dakle u linearном području

FLUXGATE MAGNETOMETAR

Vrlo često se koristi:

- pouzdan
- malih dimenzija
- male potrošnje
- raspon: 0.1 nT do 1 mT
- frekvencijsko područje: DC do nekoliko kHz

Način rada:

Permeabilnost nezasićene jezgre je vrlo velika pa se sav magnetski tok u njenoj blizini zatvara kroz nju (B). Ako kroz pobudnu zavojnicu propustimo struju veću od struje koja uzrokuje zasićenje jezgre (I_{sat}), njena permeabilnost postane vrlo mala i vanjski magnetski tok ne prolazi kroz nju. Ako kroz pobudnu zavojnicu propustimo izmjeničnu struju dovoljno velike amplitude, jezgra će naizmjence prelaziti iz negativnog u pozitivno zasićenje. Pri tome će se vanjski (mjereni) magnetski tok kroz jezgru mijenjati od minimalnog do maksimalnog iznosa.

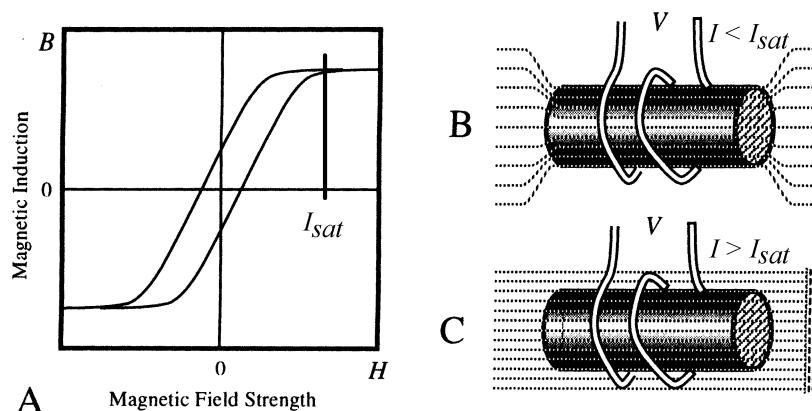


FIGURE 15.1 Magnetization curve of a ferromagnetic core (A); magnetic field around unsaturated (B), and saturated (C) core.

Ako oko jezgre s pobudnom zavojnicom namotamo signalni namotaj okomit na pobudnu zavojnicu u njemu će se inducirati napon čija amplituda će ovisiti o jakosti vanjskog (mjerеног) magnetskog polja:

$$e(t) = nA \frac{d(\mu_0 \mu_r H_{mj})}{dt} = nA \mu_0 H_{mj} \frac{d\mu_r(t)}{dt}$$

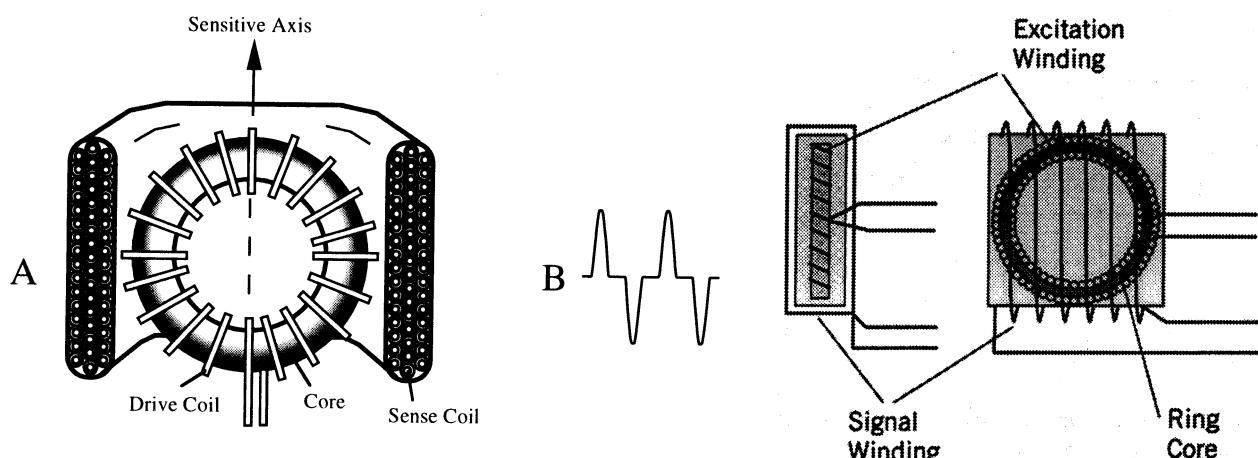


FIGURE 15.3. A magnetometer with a toroidal core (A) and output pulses (B).

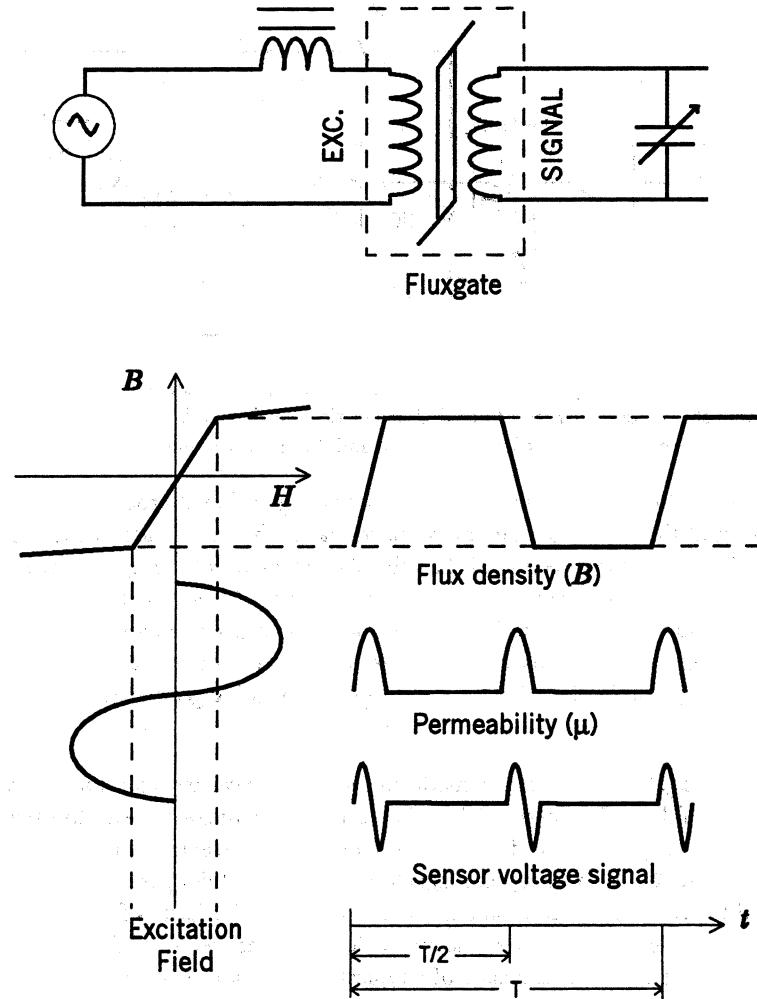


FIGURE 48.8 The excitation field of a fluxgate magnetometer alternately drives the core into positive or negative saturation, causing the core's effective permeability to switch between 1 and a large value twice each cycle.

Frekvencija induciranoj napona $e(t)$ je dvostruko veća od frekvencije pobudnog signala. Prema tome signal $e(t)$ je amplitudno modulirani signal bez vala nosioca sinkron s drugim harmonikom pobudnog signala.

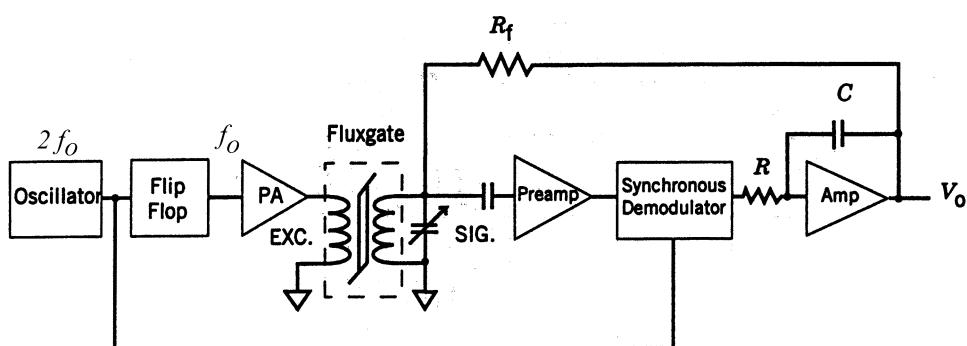


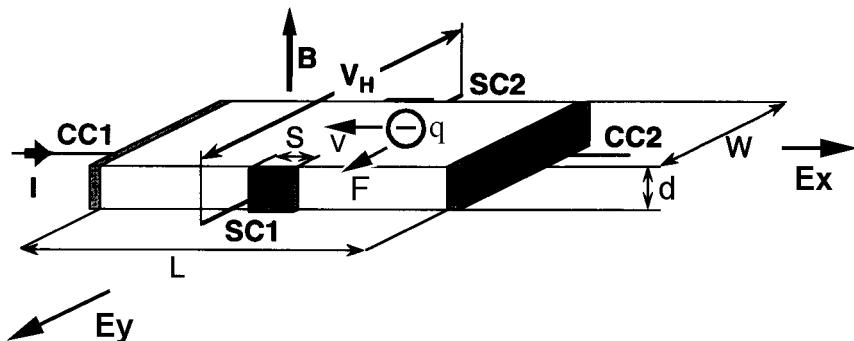
FIGURE 48.9 Typical circuit configuration for a field feedback fluxgate magnetometer. The sensor output is ac amplified, synchronously demodulated, and filtered. A magnetic field that nulls the ambient field at the sensor is produced by connecting the resistor R_f between the output and the signal winding.

Signal povratne veze održava magnetsko polje u signalnom namotaju jednako nuli, tj. u linearном dijelu $B(H)$ karakteristike magnetskog materijala.

HALLOVA SONDA

Temelji se na Hallovom efektu koji je posljedica Lorentzove sile (sila F na naboju q koji se brzinom v giba u magnetskom polju indukcije B):

$$\vec{F} = -q(\vec{v} \times \vec{B})$$



B – mjereno magnetsko polje
 E_x – narinuto električko polje
 E_y – električko polje uslijed neravnomjernog rasporeda naboja po površini senzora
 V_H – Hallov napon
 CC1, CC2 – strujni kontakti
 SC1, SC2 – signalni kontakti

Vodiči:

$$E_y = v_x B_z$$

$J_x = qnv_x$, J = gustoca struje, n = broj slobodnih naboja po jedinicnom volumenu

$$E_y = \frac{J_x B_z}{qn} = R_H J_x B_z, \quad R_H = \text{Hallov koeficijent}, \quad R_H = \frac{1}{qn}$$

Poluvodiči:

$$E_y = \mu E_x B_z, \quad \mu = \text{pokretljivost vecinskih nosioca}$$

$$E_x = \frac{J_x}{\sigma}, \quad \sigma = \text{vodljivost}$$

$$E_y = \frac{\mu}{\sigma} J_x B_z = R_H J_x B_z, \quad R_H = \text{Hallov koeficijent}, \quad R_H = \frac{\mu}{\sigma}$$

Napon mjerjen na y osi jednak je integralu električkog polja duž y osi. Ako duž x osi pustimo konstantnu struju I , tada je:

$$J_x = \frac{I}{wd}$$

a mjereni napon

$$V_H = R_H \frac{I}{d} B_z$$

Magnetska osjetljivost Hallove sonde definira se kao:

$$\gamma = \frac{V_H}{B_z} = \frac{R_H I_C}{d}$$

a definira se pri određenoj struji I_C (kontrolna struja)

Najčešće korišten materijal je InAs – ima mali temperaturni koeficijent osjetljivosti ($<0.1\%/\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Česta je izvedba od silicija u integriranim krugovima:

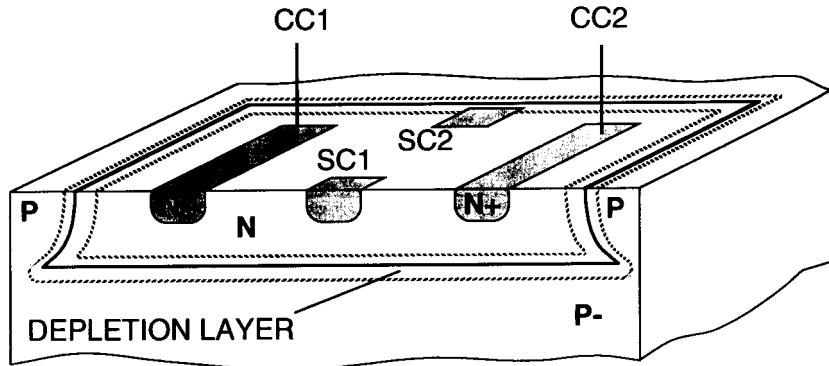


Fig. 11 Structure of integrated Hall plate in bipolar IC technology.

Mjerni sklop:

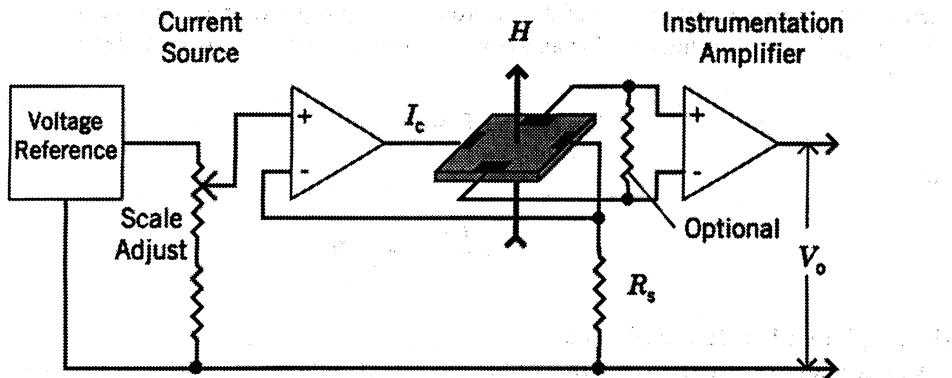


FIGURE 48.15 Example of how to construct a Hall effect gaussmeter. The operational amplifier and resistor R_s form a stable constant-current source for the Hall effect sensor. An instrumentation or differential amplifier amplifies and scales the Hall voltage. A load resistor is sometimes required across the Hall voltage output terminals.

Karakteristike:

- $I_c = 100 \text{ mA typ}$ (posebne izvedbe: 1mA)
- $\gamma = 10 \text{ mV/T}$ do 1.4 V/T
- linearnost: 0.25% do 2%
- $R_x, R_y = 1 \text{ do } 3 \Omega$
- dimenzije: $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ ($w \times L \times d$)
- mjerno područje: $50 \mu\text{T}$ do 30 T

MAGNETOOPTPORNIČKI SENZORI MAGNETSKOG POLJA

Magnetootpornički efekt: svojstvo vodljivih feromagnetskih materijala da im se mijenja otpor pod utjecajem vanjskog magnetskog polja.

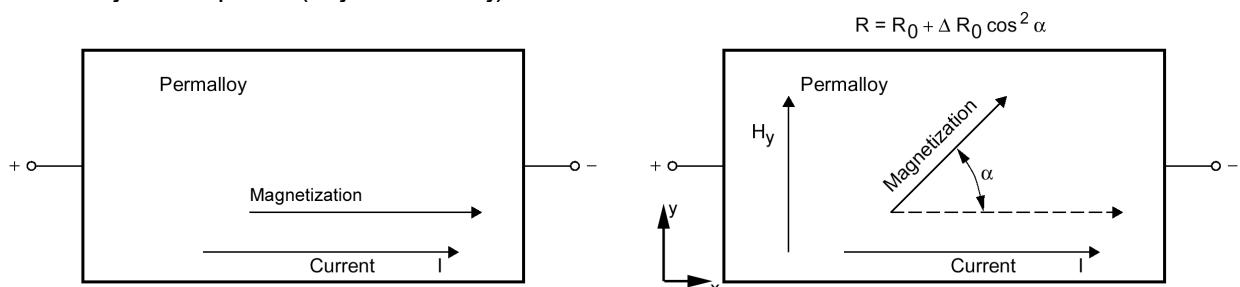
Tehnologije:

- **AMR** (engl. Anisotropic MagnetoResistance)
- **GMR** (engl. Giant MagnetoResistance)
- **TMR** (engl. Tunnel MagnetoResistance)
- **CMR** (engl. Colossal MagnetoResistance)
- **EMR** (engl. Extraordinary MagnetoResistance)

AMR (engl. Anisotropic MagnetoResistance sensors)

Najveću promjenu otpora pod utjecajem magnetskog polja pokazuje legura **permalloy** (80% Ni, 20% Fe).

Magnetski materijali imaju anizotropna magnetska svojstva – tanki film od permalloya može imati strogo uniaksijalno anizotropna svojstva ako se izloži jakom magnetskom polju tijekom nanošenja na supstrat (najčešće silicij).



Vanjsko magnetsko polje $H = 0$. Vektor magnetizacije paralelan je s tokom struje (tako je napravljen).

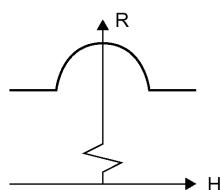
Primijenimo vanjsko magnetsko polje u ravnini senzora ali okomito na tok struje (H_y). Dolazi do rotacije vektora magnetizacije (želi se postaviti u smjer vektora vanjskog magnetskog polja) što uzrokuje promjenu otpora.

Promjena otpora ovisi o jačini magnetskog polja i o kutu α između vektora magnetizacije i smjera struje:

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

pri čemu je R_0 otpor pri $\alpha = 90^\circ$ a $\Delta R_0 = (2 \text{ do } 3\%)R_0$ za Permalloy. Kut α ovisi o jačini mјerenog magnetskog polja.

Može se pokazati da vrijedi:



$$R = R_0 + \Delta R_0 \left(1 - \frac{H_y^2}{H_0^2} \right) \quad \text{za } H_y \leq H_0$$

$$R = R_0 \quad \text{za } H_y > H_0$$

The resistance of the permalloy as a function of the external field.

Pri čemu je H_0 konstanta ovisna o materijalu

Navedena karakteristika je nelinearna, ima vrlo malu osjetljivost za male iznose mјerenog polja H_y i ne daje mogućnost određivanja smjera mјerenog polja (daje isti iznos za $+H_y$ i $-H_y$).

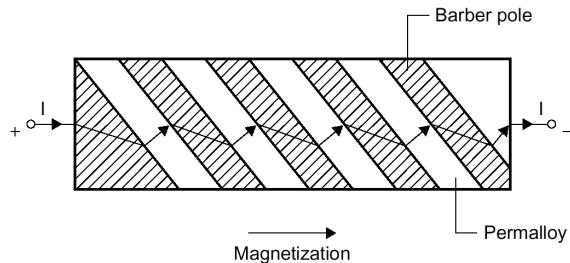


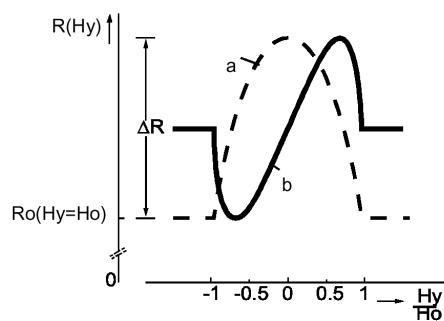
Fig.12 Linearization of the magnetoresistive effect.

Linearizacija se provodi nanošenjem traka aluminija na permalloy pod kutom od 45° u odnosu na smjer magnetizacije.

Budući da aluminij ima puno bolju vodljivost od permalloja, dolazi do zakretanja smjera struje za 45° u odnosu na vektor magnetizacije (sada je kut između smjera struje i magnetizacije $\alpha = -45^\circ$).

(engl. *Barber's pole* - spiralno isprugana motka pred ulazom u briačnicu – u anglosaksonskim zemljama)

Rezultat je karakteristika koja je linearna za male iznose mјerenog polja H_y , a moguće je odrediti i smjer vektora polja.



- a) R-H characteristic of a standard sensor,
- b) R-H characteristic of barber pole sensors

Izvedba magnetootpornika od permalloja s nanesenim trakama aluminija:

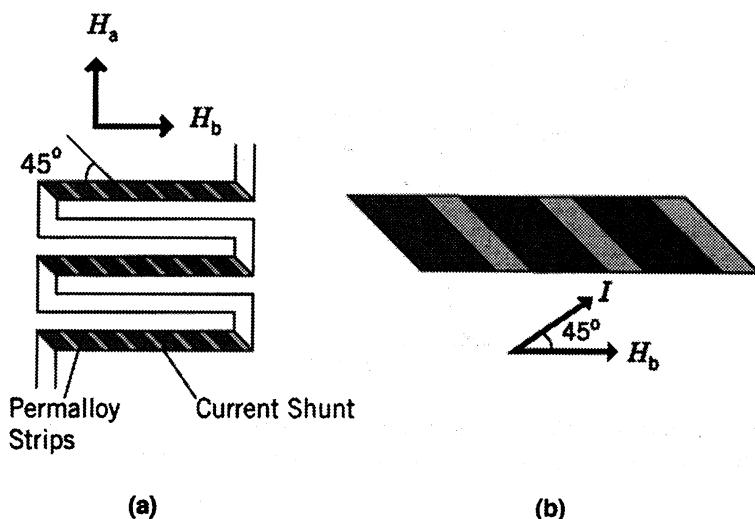


FIGURE 48.18 Magnetoresistor construction. (a) A typical AMR element consists of multiple strips of permalloy connected together in a serpentine pattern. Current shunts force the current to flow through the permalloy at 45° to the easy axis. (b) A close-up view.

Uobičajeni način spajanja magnetootpornika je u Wheatstoneov most

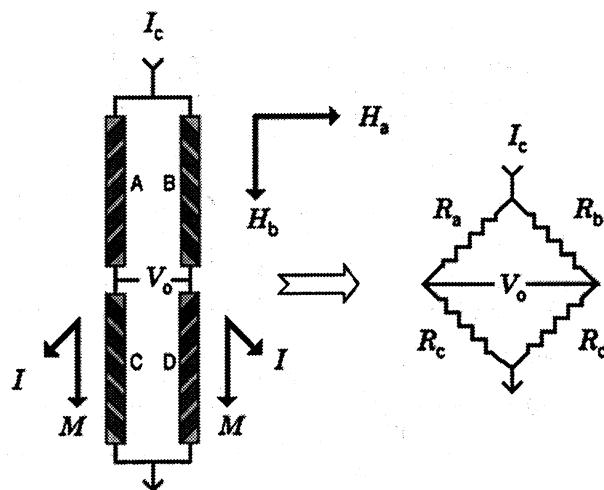
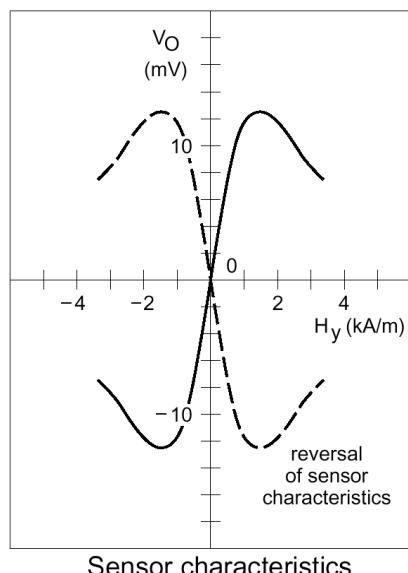


FIGURE 48.19 AMR bridge sensor. In an AMR bridge, the current shunts of resistors A and D are the same and reversed from B and C. Thus, the resistors on diagonal legs of the bridge have the same response to an applied field and opposite that of the other diagonal pair. Bridge leg resistance varies from $1\text{ k}\Omega$ to $100\text{ k}\Omega$.



Sensor characteristics

Karakteristika senzora spojenog u Wheatstoneov most za jedan smjer magnetizacije prikazana je na slici punom crtom.

Interna magnetizacija senzora ima dva stabilna položaja. Ako se senzor postavi u jako magnetsko polje smjera suprotnog internoj magnetizaciji, doći će do okretanja magnetizacije (isprekidana crta). Ovo svojstvo se može iskoristiti za kompenzaciju pomaka nule pri mjerenu slabih magnetskih polja (npr. magnetskog polja Zemlje).

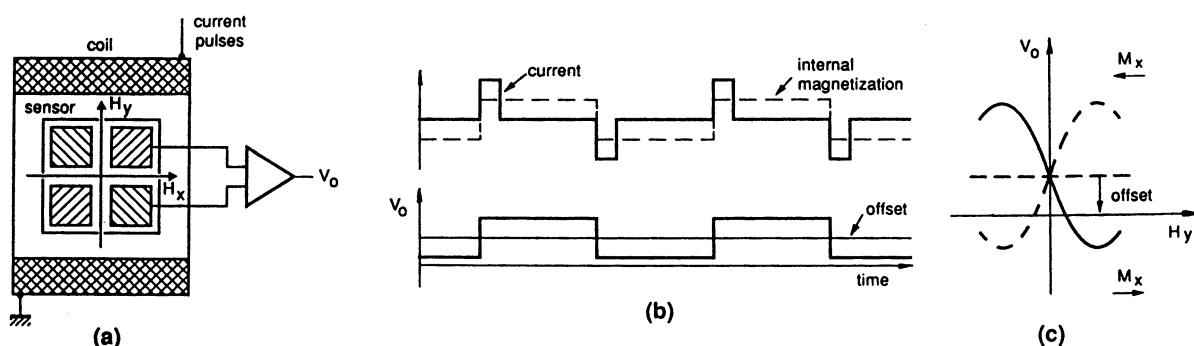
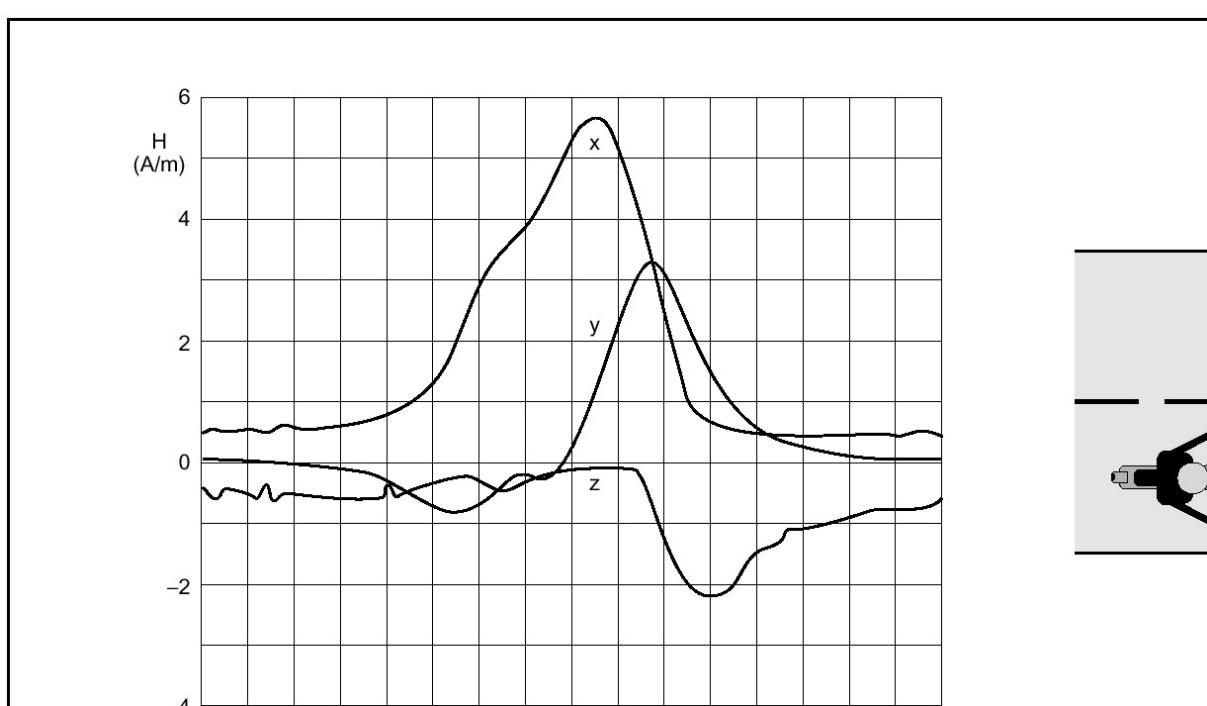
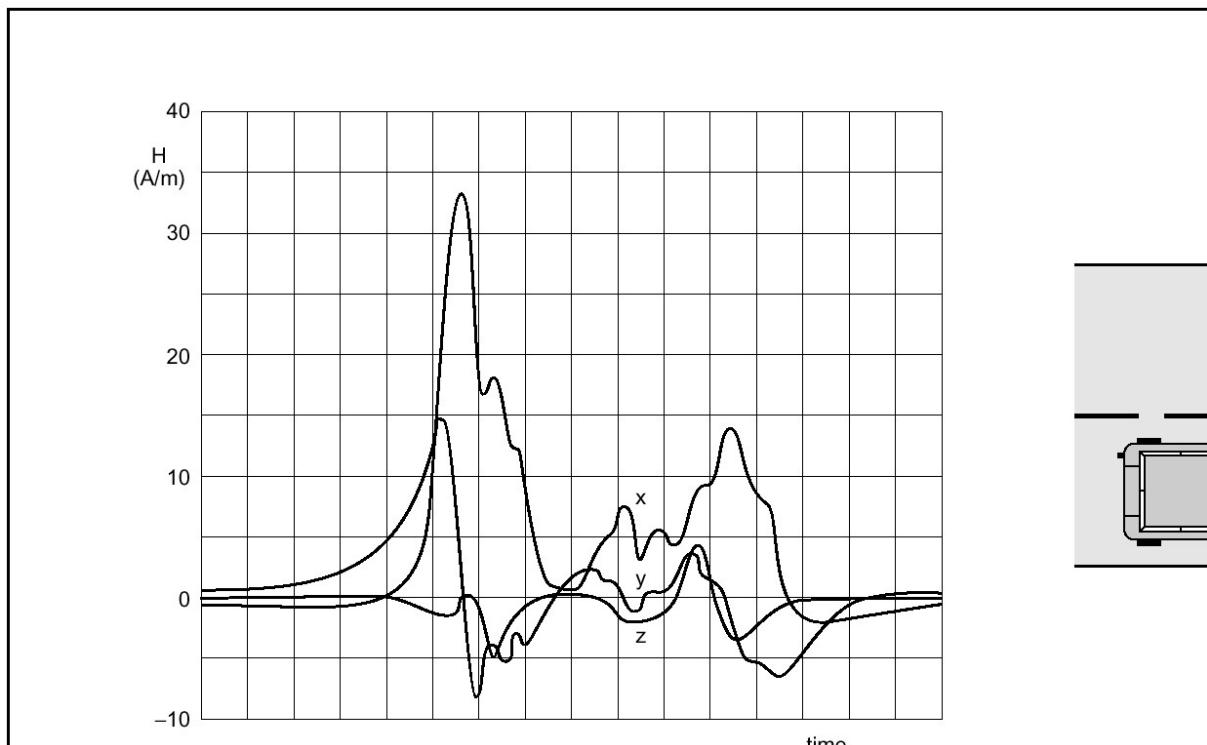


FIGURE 15.9. Measuring weak magnetic fields with the magnetoresistive sensor. A: setup using a coil, the magnetic field of which is periodically reversed. Note that the sensor's leads must be parallel to the coil axis; B: pulse diagram; C: sensor's output characteristics.

Primjena:

- elektronički kompas
- mjerjenje jakosti struje mjeranjem jakosti magnetskog polja
- mjerjenje linearног pomaka
- mjerjenje broja okretaja
- detekcija i raspoznavanje različitih vozila koja prometuju cestom



GMR (engl. Giant MagnetoResistanceSensors) Nobelova nagrada za fiziku 2007. godine.

Jedna od karakteristika Hallove sonde i AMR senzora magnetskog polja je njihova velika osjetljivost na promjenu širine zračnog raspora. Budući da ti senzori reagiraju na jakost magnetskog polja, čak i najmanja promjena razmaka između magneta i senzora ima za posljedicu značajne promjene u amplitudi signala.

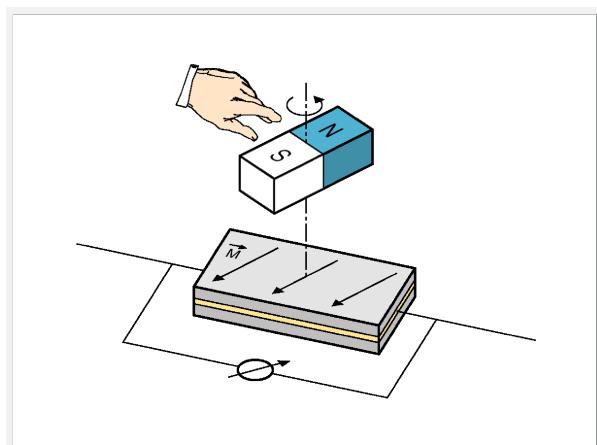


Figure 1: Orientation of the covering layers in a magnetic field

Za razliku od njih GMR senzori reagiraju samo na smjer magnetskog polja, neovisno o njegovoj jakosti. To svojstvo omogućava primjenu vrlo velikih zračnih raspora što bitno pojednostavljuje i pojeftinjuje njihovu ugradnju.

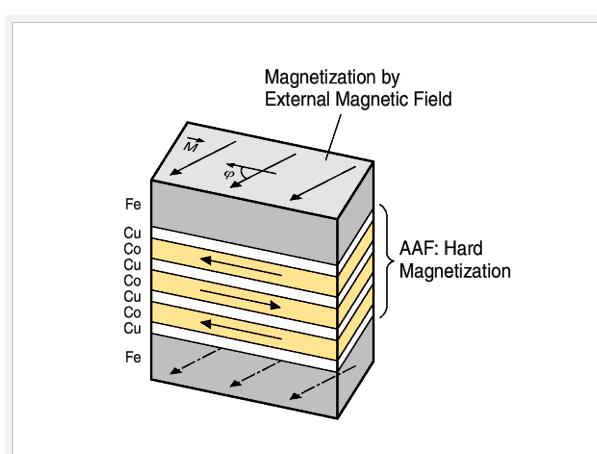


Figure 2: Layer stack: iron layers, artificial antiferromagnetic (AAF) of copper and cobalt layers

GMR senzori sastoje se od slojeva "tvrdog" magnetiziranog materijala (kobalt) između dva sloja "mekog" magnetskog materijala (željezo).

Neferomagnetski bakar odjeljuje slojeve željeza i kobalta.

Debljina pojedinih slojeva je reda veličine nekoliko nanometara.

Magnetizacija željeza prati orientaciju vanjskog magnetskog polja dok kobalt zadržava svoju tvrdnu magnetizaciju.

GMR efekt neovisan je o smjeru struje.

Samo kut između magnetizacije "tvrdih" i "mekih" magnetskih slojeva određuje ukupni otpor senzora.

Otpor takvog senzora je oko 700Ω , a relativna promjena otpora uslijed GMR efekta $\Delta R/R_0$ iznosi od 4 do 6%.

U širokom rasponu razmaka u kojem meki magnetski materijal prati orientaciju vanjskog magnetskog polja a tvrdi ostaje nepromijenjen, otpor ovisi samo o orientaciji magnetskog polja.

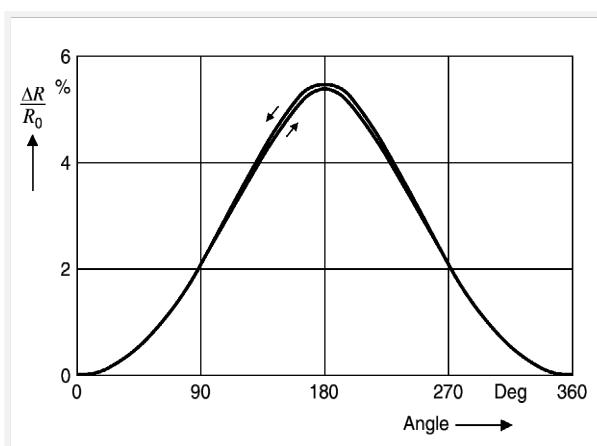
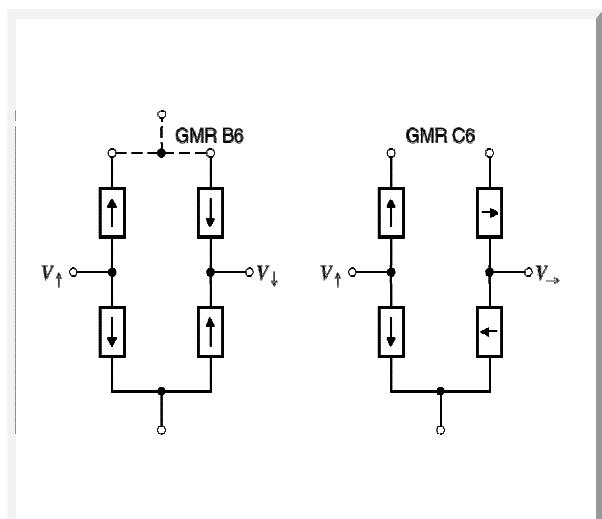


Figure 3: Change of resistance vs. angle



GMR senzori se redovito koriste u mosnom spoju. Komercijalno su dostupni u nekoliko izvedbi, ovisno o smjeru magnetizacije. Izvodi omogućavaju spajanje sva četiri senzora u puni most ili kao dva polumosta. Puni most (GMR B6) u kojem dijagonalno smješteni senzori imaju jednaki smjer magnetizacije daje najveći signal na izlazu, dok izvedba s dva polumosta čija magnetizacija je pomaknuta za 90° (GMR C6) omogućava mjerjenje kuta u punom opsegu od 360° s približno jednakom osjetljivošću.

Figure 5: Arrangement of sensor elements within the integrated bridge chips
GMR B6: 2 antiparallel half bridges or 1 full bridge (- - -).
GMR C6: 2 crossed half bridges (arrows indicate the orientation of the internal magnetization)

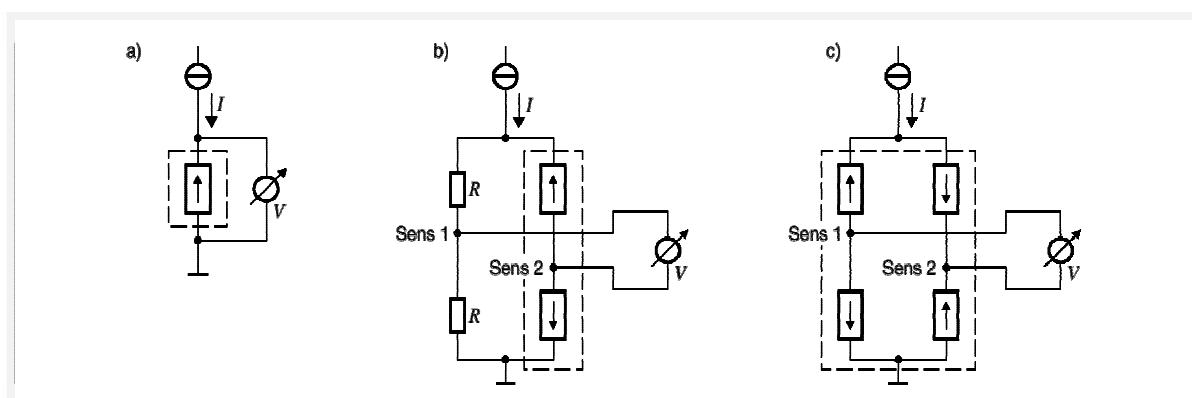


Figure 6: a) Voltage drop of a single sensor. Bridge voltage b) of a half bridge with a potential divider and c) of a full bridge

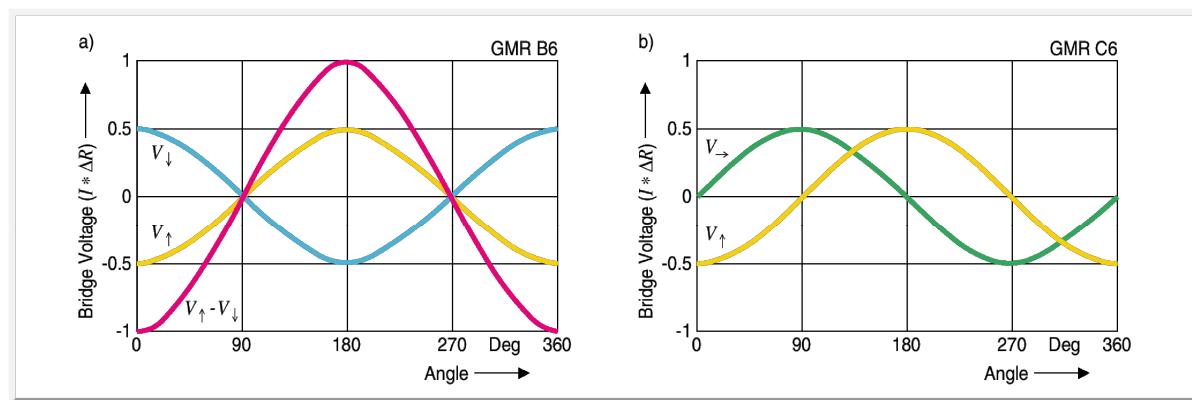


Figure 7: Bridge voltage of half bridges (V_\uparrow , V_\downarrow , V_\rightarrow) and full bridge ($V_\uparrow - V_\downarrow$) with rotation of the external magnetic field

Za iznose magnetskog polja od 5 do 15 kA/m napon na dijagonali mosta je praktički neovisan o jakosti magnetskog polja i u tom području GMR senzor registrira samo smjer vanjskog polja. Razmak između magneta i senzora ne utječe na amplitudu izlaznog napona tako dugo dok je jakost magnetskog polja u navedenim granicama.

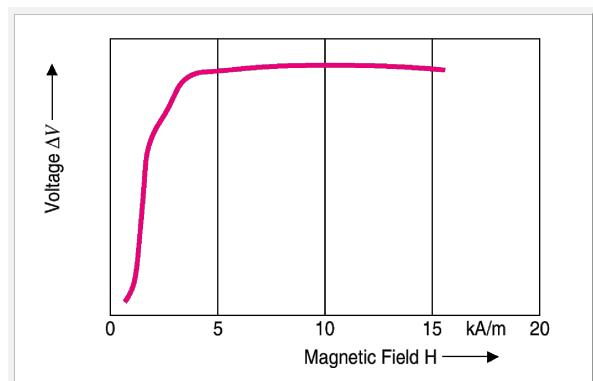


Figure 8: Maximum of voltage drop ΔV depending on the strength of the magnetic field

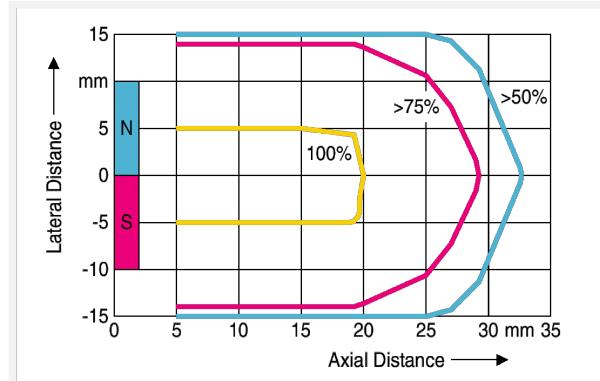
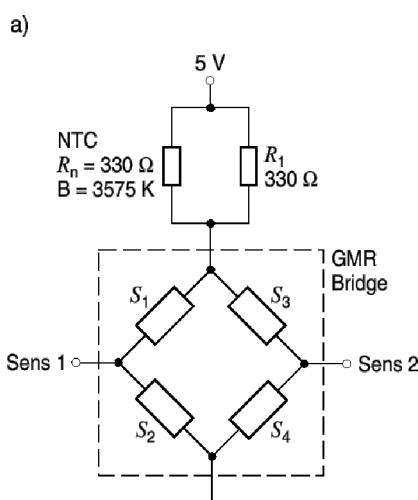


Figure 9: Relative strength of the GMR effect in the environment of a permanent magnet of samarium-cobalt with dimensions $20 * 10 * 5 \text{ mm}^3$



GMR senzor je temperaturno osjetljiv:

- otpor senzora R_0 ima **pozitivni** temperaturni koeficijent
- promjena otpora ΔR uslijed GMR efekta ima **negativni** temperaturni koeficijent

Prema tome $\Delta R/R_0$ se smanjuje s temperaturom. Zbog toga se provodi temperaturna kompenzacija, najčešće korištenjem temperaturno ovisnog izvora napajanja.
Na slici je prikazana izvedba s NTC otpornikom. Porastom temperature smanjuje se otpor NTC otpornika čime se povećava napon na samom mostu i kompenzira pad osjetljivosti.

Primjena:

Senzor absolutnog kutnog pomaka:

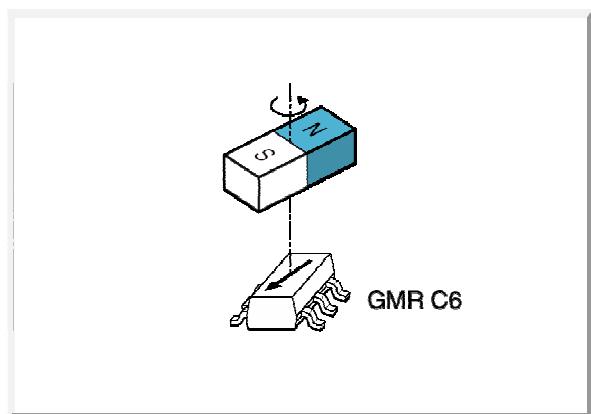


Figure 13: Revolution of the magnetic dipole over the GMR sensor

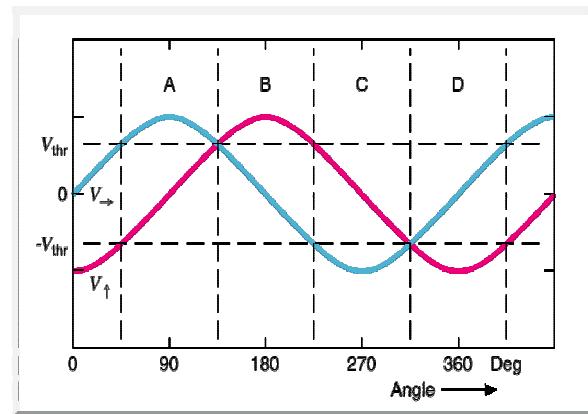


Figure 14: Output signals of two crossed half bridges (GMR C6) in the 4 quadrants

Senzor linearnog pomaka

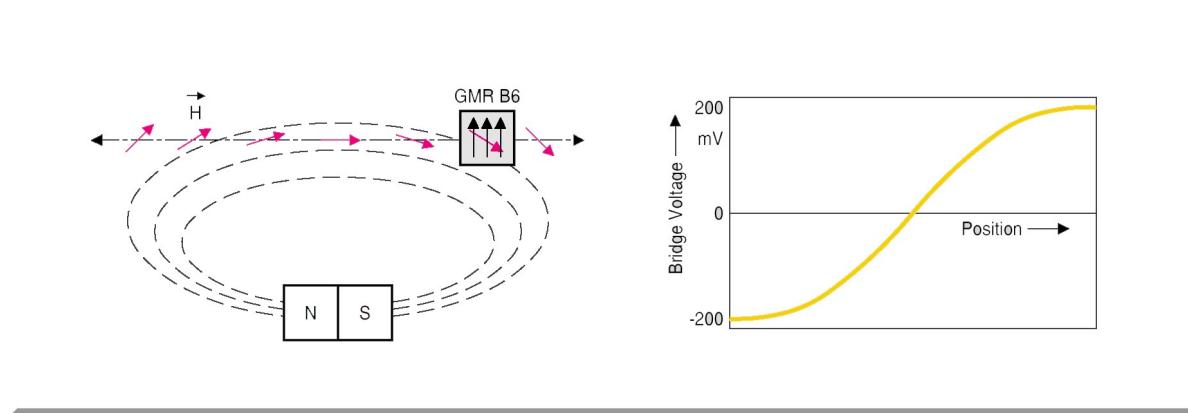


Figure 19: Linear motion of a GMR sensor through the field of a magnetic dipole.

Praćenje položaja glave ink-jet printera

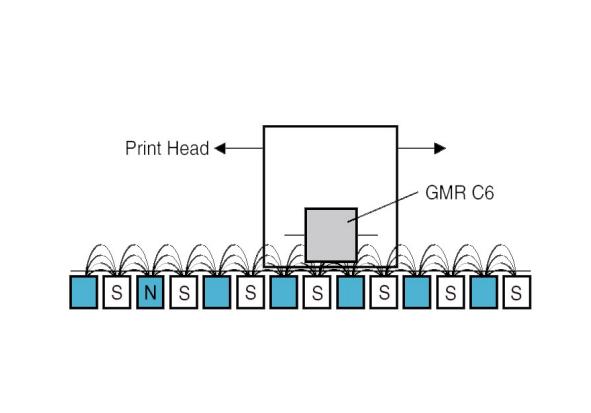


Figure 22: Print head position sensing

SQUID - SUPERCONDUCTING QUANTUM INTERFERENCE DEVICE

Najosjetljivija metoda, koristi se za mjerjenje najslabijih magnetskih polja, najčešće u medicini (npr. MKG – magnetokardiogram, MEG – magnetoencefalogram, itd.).

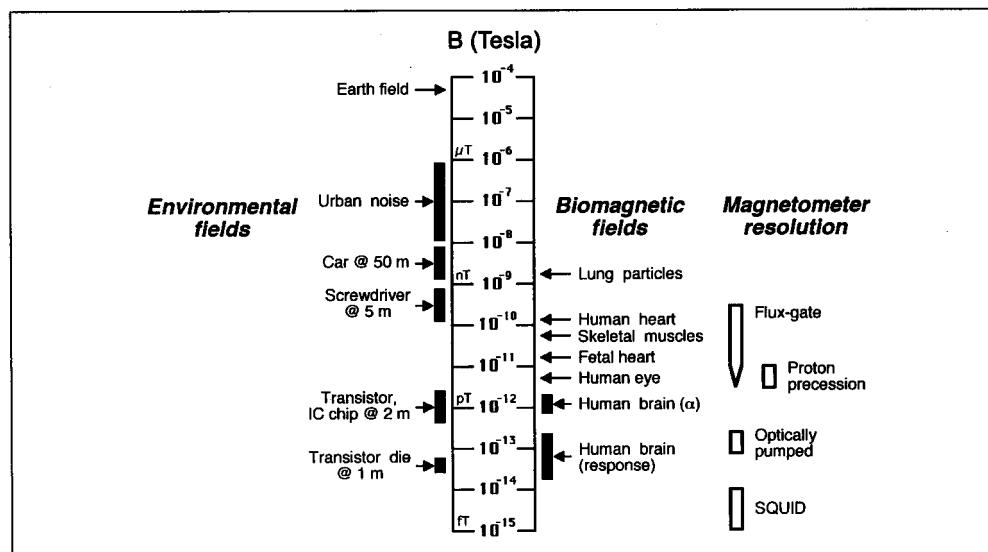


Fig. 2.1: Magnetic induction of biomagnetic fields and of environmental magnetic field disturbances as well as the magnetometer resolution; by courtesy of J.Vrba

Supravodljivost: kod nekih materijala, na vrlo niskim temperaturama, na određenoj temperaturi T_c (kritična temperatura) električni otpor pada na nulu.

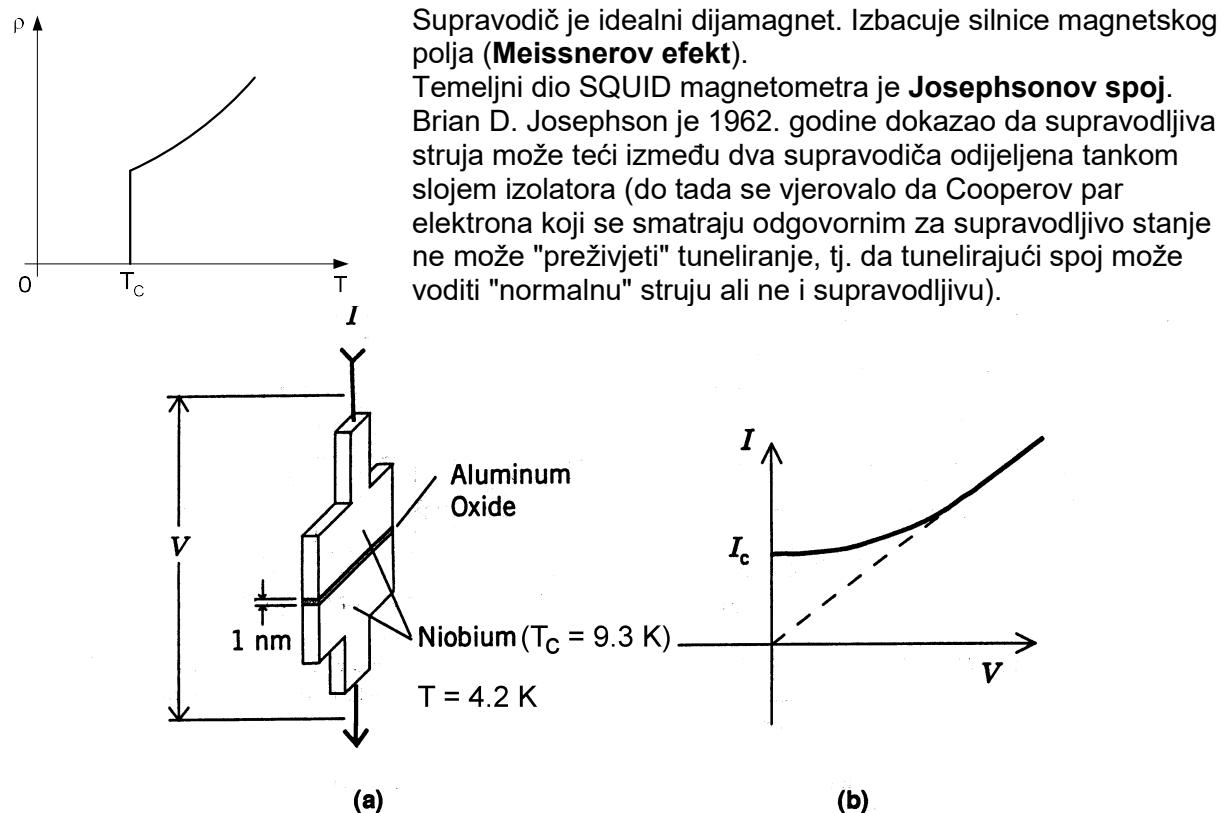


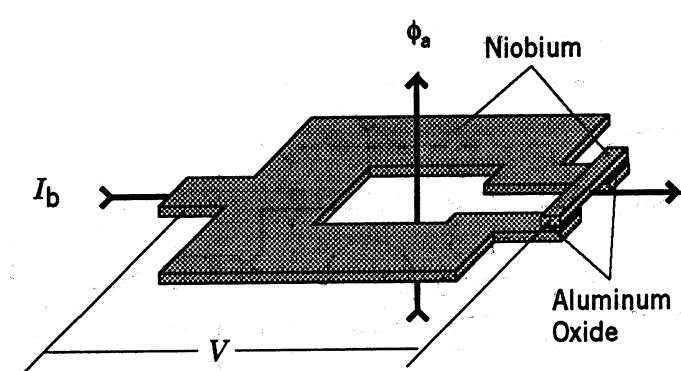
FIGURE 48.11 The Josephson junction in (a) consists of a superconductor such as niobium separated by a thin insulation layer. The voltage (V) vs. current (I) curve in (b) shows that a superconducting current flows through the junction with zero volts across the junction.

DC SQUID magnetometar:

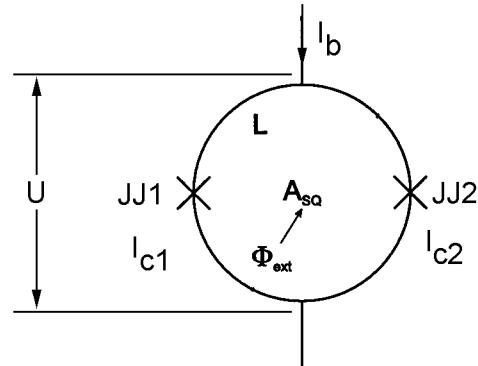
Sadrži dva Josephsonova spoja:

Iznos supravodljive struje (kritična struja, I_c) koja može teći kroz Josephsonov spoj ovisi o vanjskom magnetskom polju i to je ključna činjenica koja se koristi za mjerjenje magnetskog polja.

Izvedba:

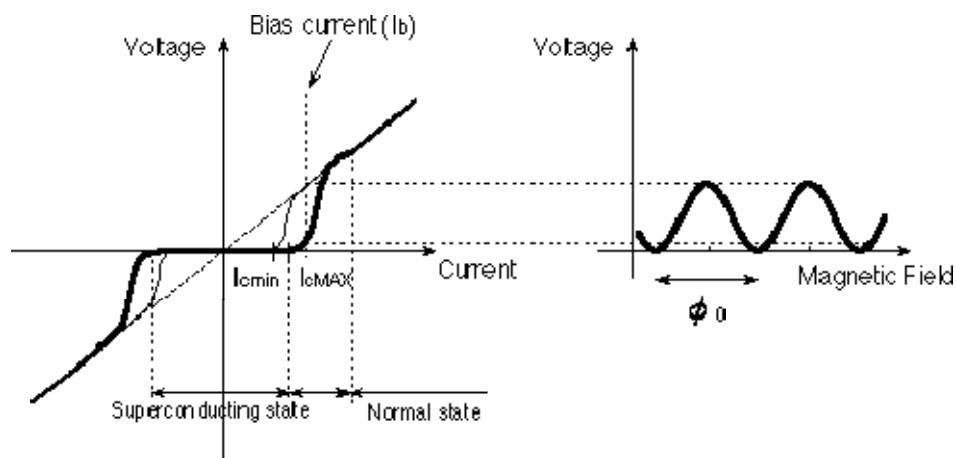


Shematski simbol:



Kritična struja je periodička funkcija magnetskog toka prisutnog na Josephsonovom spoju, period je kvant magnetskog toka (fluksion), $\phi_0 = h/2e = 2.0679 \cdot 10^{-15}$ Vs. Maksimalne vrijednosti (I_{cMAX}) postižu se za iznose toka jednake $n\phi_0$. Minimalne vrijednosti (I_{cmin}) postižu se za iznose magnetskog toka jednake $(n+1/2)\phi_0$.

Taj efekt naziva se **DC Josephsonov efekt**.



$U(I)$ karakteristika DC SQUID-a pokazuje da za struje manje od kritične (I_c), Josephsonov spoj vodi supravodljivu struju, tj. napon U jednak je nuli. U prisutnosti magnetskog toka kroz SQUID petlju, smanjuje se iznos kritične struje I_c . Budući da je I_c periodička funkcija magnetskog toka, s periodom ϕ_0 , uz struju I_b postavljenu na iznos malo veći od I_{cMAX} u prisutnosti vanjskog magnetskog polja napon na SQUID-u će se periodički mijenjati s periodom ϕ_0 . Prema tome promjene magnetskog polja možemo mjeriti praćenjem promjene napona U .

Izvedba DC SQUID magnetometra:

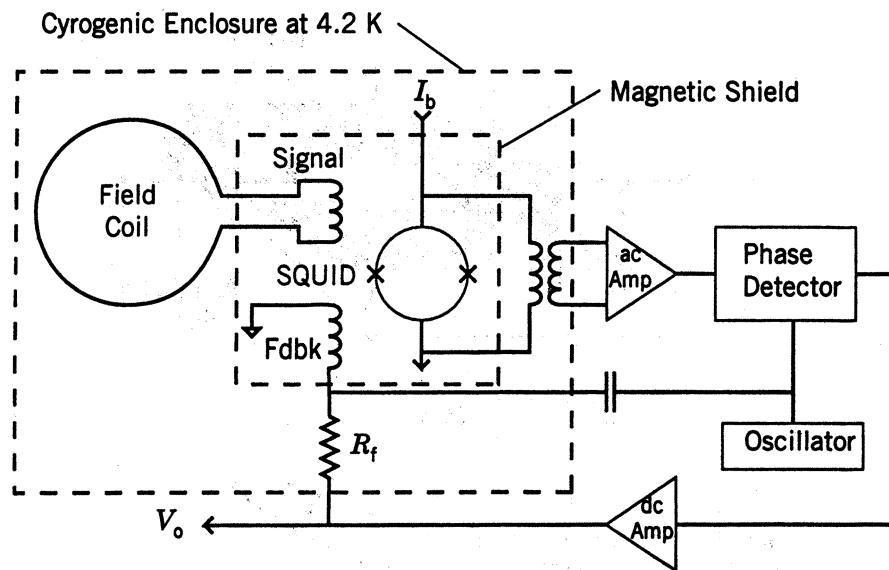
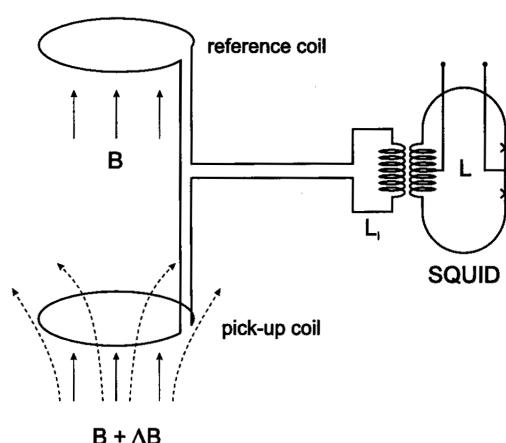


FIGURE 48.13 Wide dynamic range dc SQUID magnetometer. A magnetic field produced by connecting resistor R_f between the output and a feedback coil keeps the field in the SQUID within one flux quantum over its operating range. (Adapted from Wellstood, Heiden and Clark, 1984.)

Mjereno magnetsko polje induktivno se pojača i prenosi u SQUID koji je magnetski oklopljen. Slabo magnetsko polje frekvencije 100 kHz do 500 kHz superponira se mjereno magnetskom polju. Izlaz iz SQUID-a je amplitudno modulirani signal bez vala nosioca čija amplituda je modulirana promjenom mjerene magnetskog polja, a faza pokazuje smjer promjene.

Obrađeni signal (fazni demodulator) preko povratne veze stvara magnetsko polje suprotno mjereno, čime se radna točka SQUID-a zadržava u okolini I_b .



Radi smanjenja utjecaja parazitnog magnetskog polja (npr. zemljinih magnetskih polja) koriste se **gradiometri**:

Gradiometar prvog reda ne mjeri magnetsko polje već razliku magnetskog polja između dvije točke, tj. gradijent polja.

Dvije zavojnice (referentna i signalna) motane su u suprotnom smjeru. Homogeno magnetsko polje Zemlje se poništava, ostaje samo komponenta ΔB mjerene izvora (opada s $1/r^2$ do $1/r^3$ s udaljenosću r od izvora).