

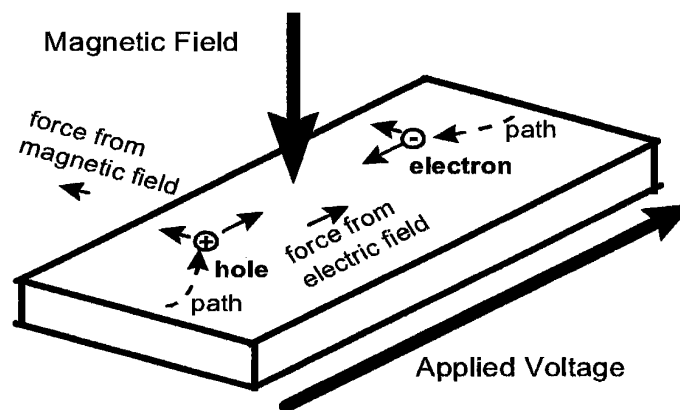
Merilniki gostote magnetnega polja na osnovi Lorentzove sile

Lorentzova sila je temelj tako Hallovega kot tudi magnetoupornostnega efekta v polprevodniških strukturah.

Zgradba in osnovni princip delovanja Hallove sonde

Hallov efekt je odkril Edwin Hall leta 1879. Efekt temelji na Lorentz-ovi sili, ki deluje na gibajoče nosilce električnega naboja v vseh snoveh, ko so le te izpostavljene zunanjemu magnetnemu polju.

Za zgled vzmemimo trak iz polprevodniške snovi na konce katerega je priključen generator enosmerne napetosti. Sila električnega polja prisili proste nosilce naboja k gibanju v nakazani smeri (slika)



V prisotnosti tujega magnetnega polja, ki je pravokotno na površino senzorja, pa se pot elektronov in vrzeli ukrivi k stranskima stranicama. Na stranicah se kopiči električni naboj a le toliko dolgo, dokler sila električnega polja zaradi nakopičenega naboja ni enaka Lorentzovi sili, ki deluje na gibajoči naboj

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

Napetost zaradi nakopičenega naboja se imenuje Hallova napetost

$$u_H = E_H d = v \cdot B \cdot d,$$

kjer je d širina traku. Napetost je tem večja, ter s tem tudi tehnično uporabna, čim večje je razmerje med dolžino in širino polprevodniškega traku l/d .

Celotno število prostih nosilcev naboja, ki v časovni enoti preide ploskev S je enako gostoti toka J

$$J = v \cdot N \cdot q.$$

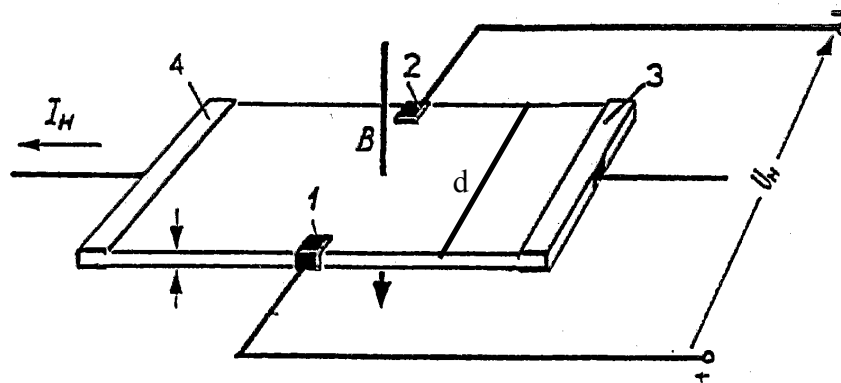
S preoblikovanjem enačbe () dobimo

$$u_H = \frac{J}{N \cdot q} B \cdot d \rightarrow B = k \cdot u_H, \quad k = \frac{N \cdot q}{J \cdot d},$$

kjer vidimo, da je gostota magnetnega polja premosorazmerna snovni konstanti senzorja in izmerjeni Hallovi napetosti. Odločujoč parameter snovne konstante predstavlja mobilnost elektronov

$$\frac{1}{N \cdot q},$$

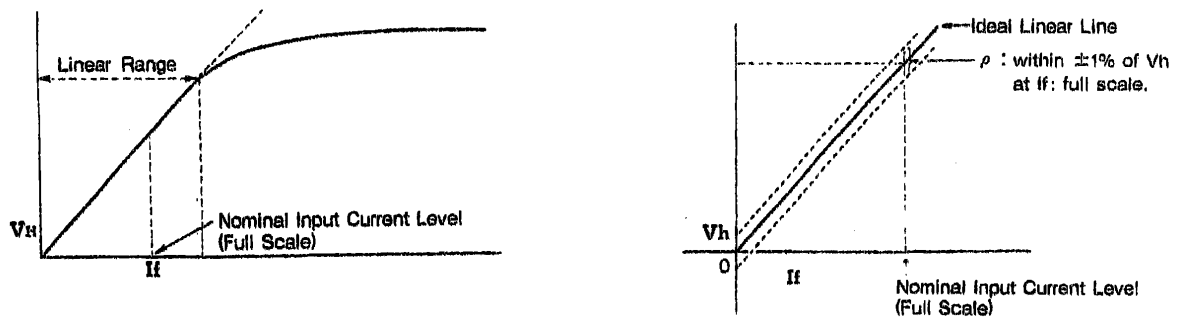
ki je od kovine do kovine različna. Najvišja je ravno pri polprevodniških materialih (InSb, InAs, GaAs). Mobilnost prostih nosilcev je temperaturno zelo odvisna kar velja tudi za Hallovo napetost u_H in $R_{in}(J)$ (R_{in} ... notranja upornost senzorja).



Slika 1: Osnovna geometrija Hallove sonde

Splošne lastnosti sonde

- napajalni tok sonde je odvisen od njene debeline in znaša od nekaj 10 mA do 100 mA,
- potek izhodne napetosti (enačba 2) v odvisnosti od B je v splošnem nelinearen. Prenosna karakteristika se sestoji iz linearnega in nelinearnega dela.



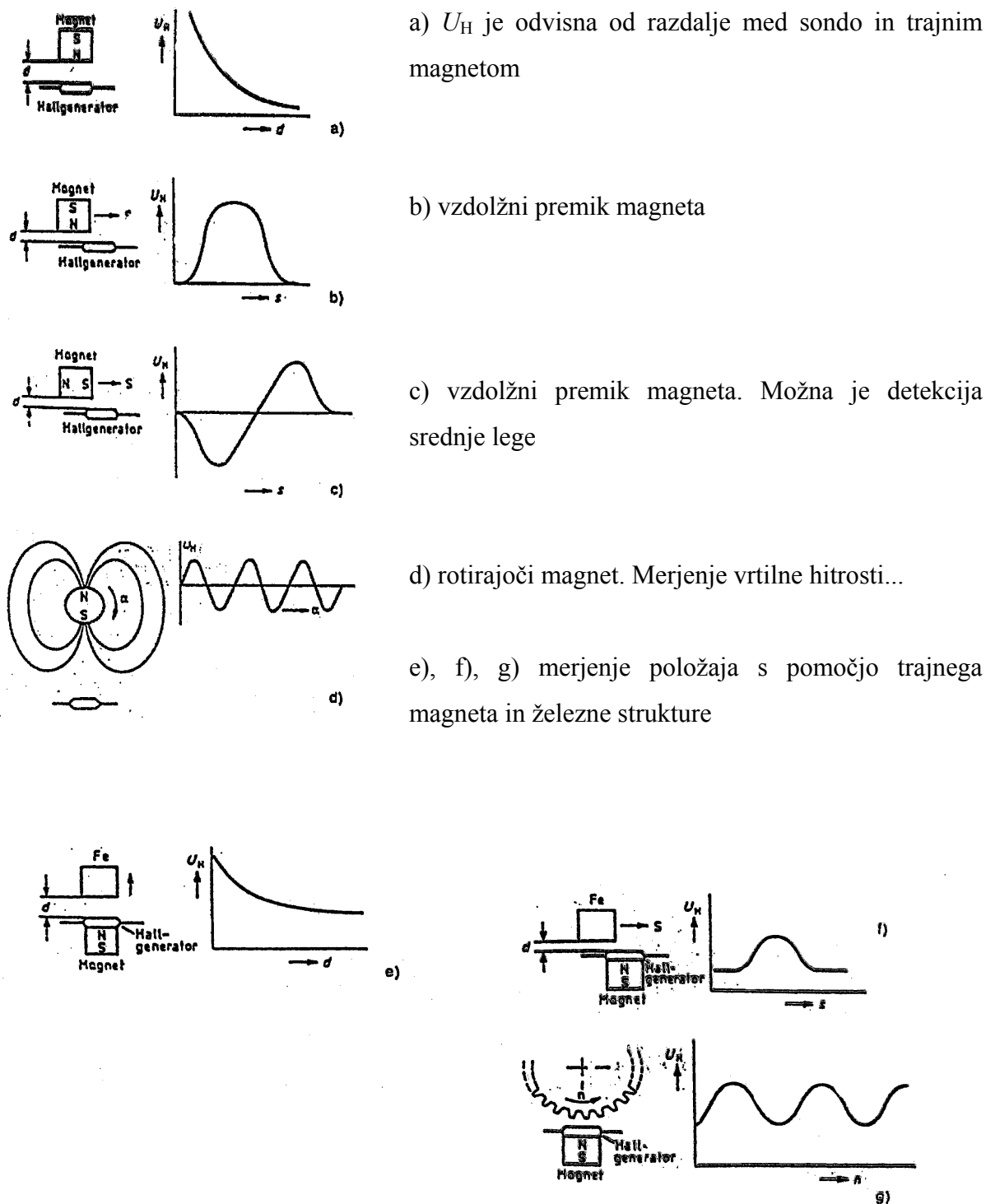
Slika 2:

Uporabno je zgolj linearno področje. Njegovo odstopanje podajamo z *linearnostjo* in *začetno napetostjo* (offset).

- velika temperaturna odvisnost izhodne napetosti U_H .

Področja uporabe

Merjenje položaja s pomočjo trajnega magneta



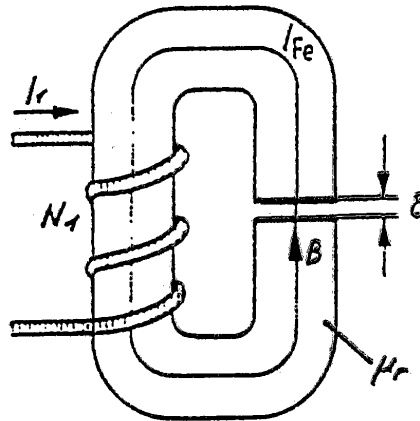
Slika 3:

2. Merilnik toka in napetosti

a) odprtozančni merilnik

Zgradbo enostavnega tokovnega merilnika kaže slika 5. Merilnik vsebuje magnetno jedro na katerega je navito primarno navitje (N_1). Skozi navitje teče merjeni tok, ki v jedru ustvari magnetni fluks z gostoto

$$B = \frac{\mu_0}{\delta + \frac{l_{FE}}{\mu_r}} N_1 I_1 \quad (3)$$

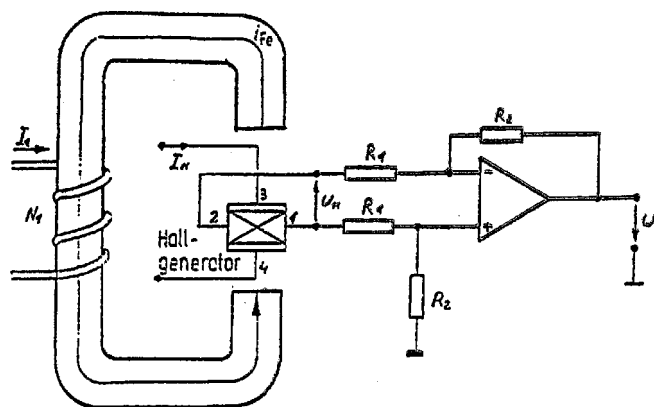


Slika 4: Vzbujačno navitje z jedrom in režo

Hallova sonda je nameščena v zračni reži, zato se na njenem izhodu generira napetost, ki je premosorazmerna B ter s tem tudi merjenemu toku I_1 .

$$U_H = \frac{R_H I_H \mu_0}{(\delta + \frac{l_{FE}}{\mu_r}) d_H} N_1 I_1 \quad (4)$$

$$U_H = k_H N_1 I_1 \quad (5)$$



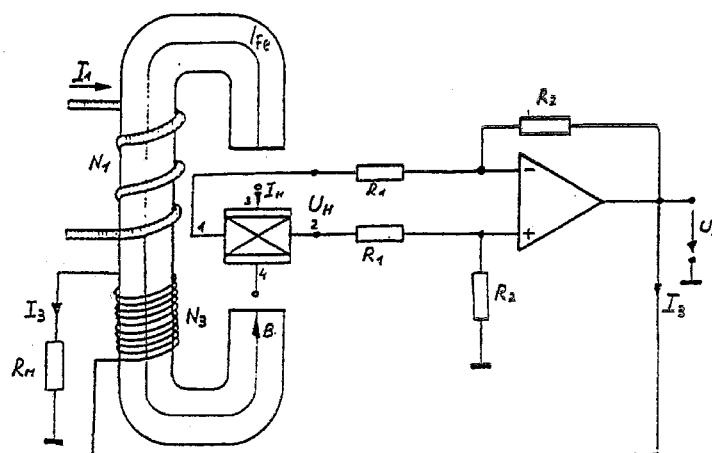
Slika 5:

Lastnosti odprtozančnega merilnika:

- dodatna nelinearnost in temperaturna odvisnost merilne karakteristike, zaradi magnetnega jedra. Napake zaradi širine in strmine histerezne zanke magnetnega jedra,
- tokovne razmere v merilnem tokokrogu so spremenjene. To je zlasti razvidno v izmeničnem stacionarnem stanju, ko skozi vzbujačno navitje teče konstanten izmenični tok, ki na navitju povzroča induktivni padeč napetosti (če ohmsko upornost navitja zanemarimo),
- začetna preostala napetost $U_{H,offset}$.

b) zaprtozančni merilnik (kompenzacijski)

Načelno zgradbo merilnika kaže slika 6.



Slika 6:

V primerjavi z zaprtozančnim principom je na jedru dodano kompenzacijsko navitje N_3 . Predpostavimo, da je v začetnem trenutku opazovanja tok skozi kompenzacijsko navitje enak 0 A (razklenjena vez ojačevalnik-kompenzacijsko navitje). Izhodna napetost ojačevalnika je premosorazmerna toku v N_1 , zato v trenutku sklenitve ojačevalnika in kompenzacijskega navitja steče kompenzacijski tok, ki s svojimi ampernimi ovoji nasprotuje magnetnemu fluksu, ki ga povzroča tok I_1 . Magnetni fluks (ter tudi B) se zato v jedru zmanjšuje vse do vrednosti nič, ko velja enakost ampernih ovojjev

$$N_1 I_1 = N_3 I_3 \quad (6)$$

Hallova sonda meri razliko magnetnega polja.

$$U_H = k_H (N_1 I_1 - N_3 I_3) \quad (7)$$

$$I_3 = \frac{F_A}{R_M} U_H \quad (8)$$

$$I_3 R_M = F_A k_H (N_1 I_1 - N_3 I_3) \quad (9)$$

$$I_3 = \frac{N_1 I_1}{N_3 \left(1 + \frac{R_M}{F_A k_H N_3}\right)} \cong \frac{N_1}{N_3} I_1 \quad ; F_A \rightarrow \infty \quad (10)$$

Če ima ojačevalnik zelo visoko ojačenje F_A in navitji popoln magnetni sklop, potem je polje povzročeno s tokom I_1 popolnoma kompenzirano s poljem toka I_3 .

Lastnosti zaprtozančnega merilnika:

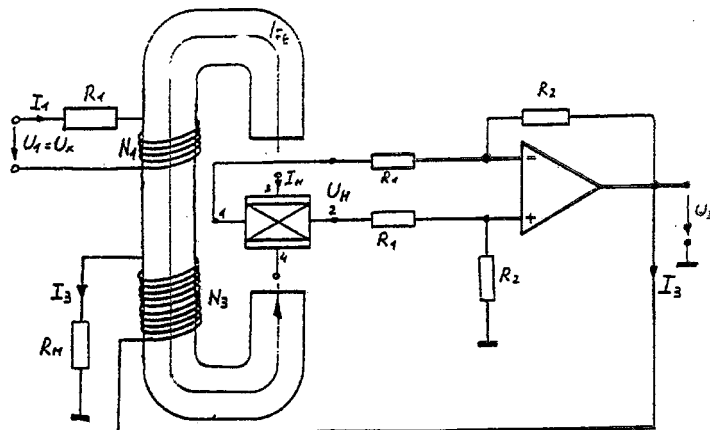
- induktivni padec napetosti v merilnem tokokrogu na N_1 je odpravljen,
- nelinearnost magnetnega jedra nima vpliva, saj je delovna točka $B \approx 0$ T,
- velika temperaturna odvisnost napetosti U_H .

Odstopanja realnega merilnika:

- nepopoln magnetni sklop med navitjema N_1 in N_3 ,
- končno ojačenje in končna hitrost ojačevalnika,
- padec napetosti na induktivni upornosti pL_3 .

c) merilnik napetosti

Merilnik napetosti se načelno razlikuje samo v številu ovojjev N_1 ter dodatnem preduporu R_1 (slika 7).



Slika 7: Osnovna topologija napetostnega merilnika s Hallovo sondo

Da sta v primarnem tokokrogu tok in napetost enake oblike, mora biti njegov induktivni značaj čim manj izrazit. Induktivnost L_1 je odvisna od kvadrata ovojjev N_1 (pri odprtozančnem principu) oziroma od nepopolne kompenzacije magnetnega fluksa v jedru. Upor R_1 določa merilno območje napetosti

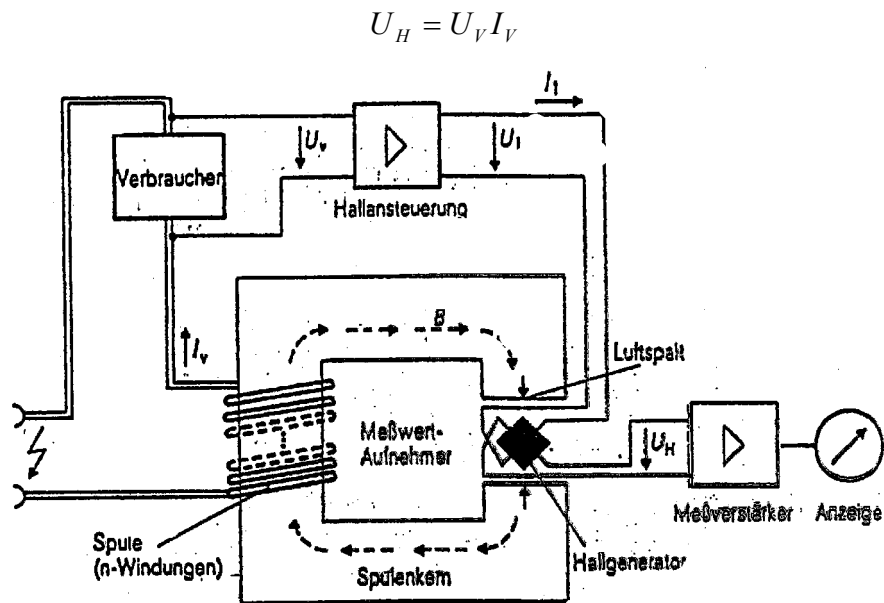
$$R_1 = \frac{U}{I_N}. \quad (11)$$

Ker pri napetostnih merilnikih težimo k čim večji notranji upornosti, se moramo sprijazniti s slabšim frekvenčnim odzivom.

Opisani napetostni merilnik ni kompenzacijski, kljub temu da je uporabljen zaprtozančni princip zaznavanja magnetnega polja!

3. Merjenje moči

Blokovno shemo merilnika moči kaže slika 8. Merilni sistem je podoben kot pri tokovnem merilniku le da je napajalni tok Hallove sonde proporcionalen napetosti bremena.



Slika 8: Merilnik moči