

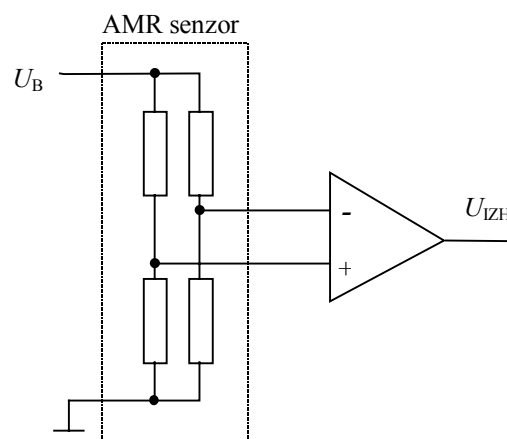
ANIZOTROPNI MAGNETNI SENZOR S SPREMENLJIVO UPORNOSTJO (ANISOTROPIC MAGNETORESISTIVE SENSOR)

Fizikalni pojav, da se feromagnetnim materialom v prisotnosti tujega zunanega polja spremeni njihova upornost, je bil opažen že leta 1856 (Lord Kelvin). Njegova praktična uporaba pa se je razširila šele z obvladovanjem polprevodniške tehnologije, ki omogoča izdelavo tankoslojnih rezin, v kakršnih je omenjeni pojav najizrazitejši ter s tem tudi tehnično zanimiv.

AMR senzorji so za razliko od magnetnih uporov in GMR senzorjev namenjeni predvsem merjenju in zaznavanju šibkih magnetnih polj (10^{-9} T do 10^{-3} T). Tako se uporabljajo npr. za meritev zemeljskega magnetnega polja (kompas), zaznavajo anomalije magnetnega polja zaradi prisotnosti drugih feromagnetnih objektov (detekcija avtomobilov, detektorji kovin, iskanje rud), uporabljajo pa se tudi pri merjenju tokov. V zadnjem času se najštevilčneje uporabljajo kot bralne glave v kasetnih in disketnih pogonih (IBM).

Zgradba

Senzor je zgrajen iz tankega nanosa zlitine niklja in železa (Ni-Fe ali Permalloy) na polprevodniški silicijevi rezini. Nanos zlitine je oblikovan v obliki uporovnega traku. Ker je sprememba upornosti takšnega traku v prisotnosti zunanega polja le od 2 % do 3 %, je senzor običajno sestavljen iz štirih uporovnih trakov, ki tvorijo t.i. Wheatstonov mostič. Diagonalna napetost mostiča, ki je premosorazmerna zunanemu magnetnemu polju, je ojačana s pomočjo instrumentacijskega ojačevalnika.

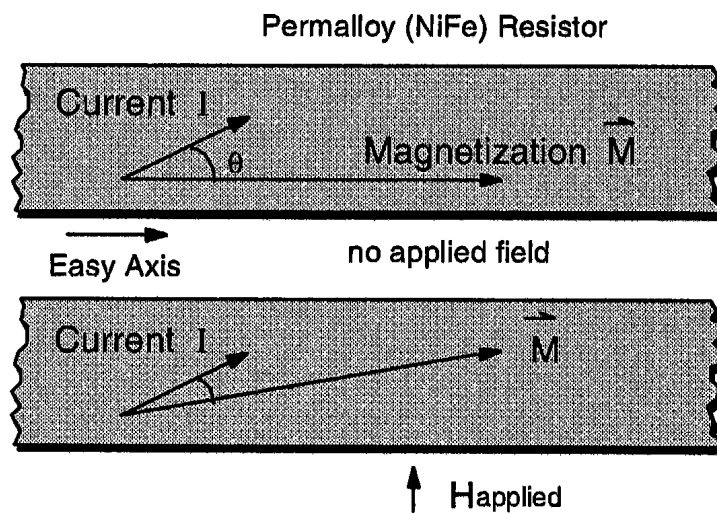


Slika 1: AMR senzor v obliki Wheatstonovega mostiča

Na opisani način je možno detektirati jakost in smer magnetnega polja vzdolž ene smeri senzorja.

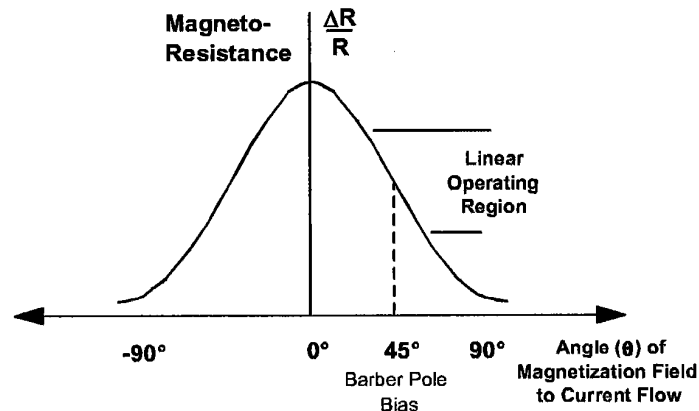
Najboljše lastnosti AMR senzorja dosežemo tedaj, ko so magnetne domene v tankem sloju Permalloya usmerjene v isto smer. S tem je zagotovljena največja občutljivost senzorja na tuje magnetno polje in dobra ponovljivost meritve zaradi ozke histerezne zanke. Med proizvodnjo je zato sloj Permalloya nanešen v prisotnosti močnega magnetnega polja, ki postavi magnetne domene v želeno smer. Skupno polje teh domen tvori lastno magnetno polje, ki je ponazorjeno z vektorjem magnetne polarizacije \vec{M} . Vektor \vec{M} je glede na vzdolžno os upora lahko orientiran v poljubni smeri vendar pa je magnetenje v vzdolžni smeri najenostavnejše in tudi najbolj homogeno.

Predpostavimo, da sta vektor magnetne polarizacije in vektor toka, ki teče skozi upor, premaknjena za kot θ . V prisotnosti tujega polja H_{appl} , ki je usmerjen pravokotno na upor, se bo kot med vektorjem \vec{M} in vektorjem toka zmanjšal. Posledica tega je sprememba upornosti $\Delta R/R$, ki je najizrazitejša pri kotu $\theta=0$. Pojav spremembe upornosti Permalloya v odvisnosti od zunanega magnetnega polja se imenuje magnetoupornostni (Magnetoresistive) efekt.



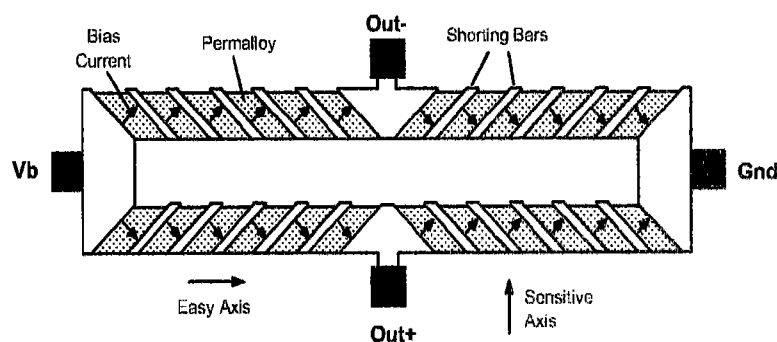
Slika 2: Zasuk vektorja \vec{M} v tujem magnetnem polju H_{appl}

Tipično odvisnost spremembe upornosti uporovnega stolpiča od kota θ med tokovnim vektorjem in vektorjem \vec{M} , kaže slika 3.



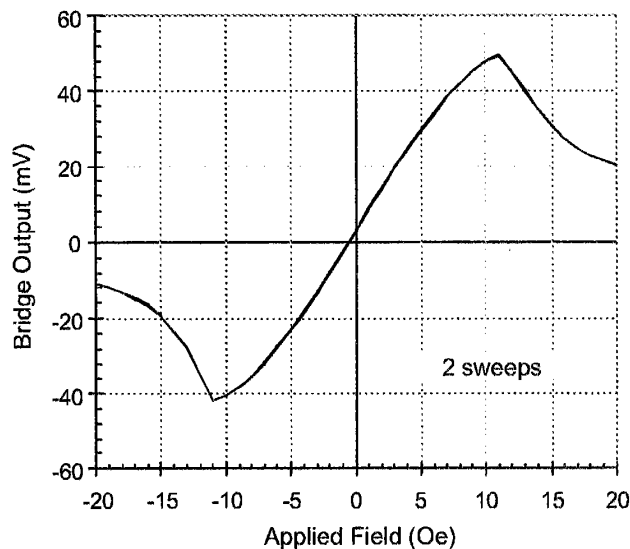
Slika 3: Odvisnost magnetoupornostnega efekta od kota zasuka θ

Vidimo, da je sprememba upornosti simetrična glede na kot θ , medtem ko linearno območje, ki ga je moč tehnično uporabiti, leži pri $\theta = 45^\circ$. Želeni premik med tokom in vektorjem polarizacije, ki ga ni možno postaviti pod kotom 45° enakomerno po vsej dolžini uporovnega stolpča, lahko dosežemo le s prostorskim zasukom toka, ki teče skozi sloj Permalloya. V ta namen so na sloj Permalloya pod kotom 45° stopinj nanešeni nizkoohmski trakovi, ki predstavljajo ekvipotencialne ploskve s konstantnim električnim potencialom. Ker je med dvema nizkoohmskima trakovoma enaka potencialna razlika (v poljubni točki) bo tok tekkel v smeri najmanjšega upora t.j. pod kotom 45° stopinj glede na vzdolžno os uporovnega stolpča.



Slika 4: AMR senzor v obliki Wheatstonovega mostiča z zasukom tokovnega vektorja

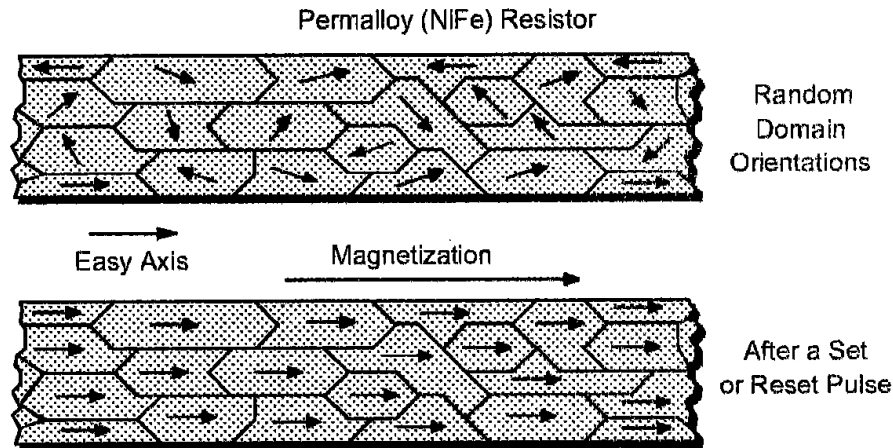
Sprememba upornosti vseh štirih vej se odraži v spremembi diagonalne napetosti Wheatstonovega mostiča ($u = V_{\text{Out}+} - V_{\text{Out}-}$) kot to kaže slika 5.



Slika 5: Statična karakteristika AMR senzorja

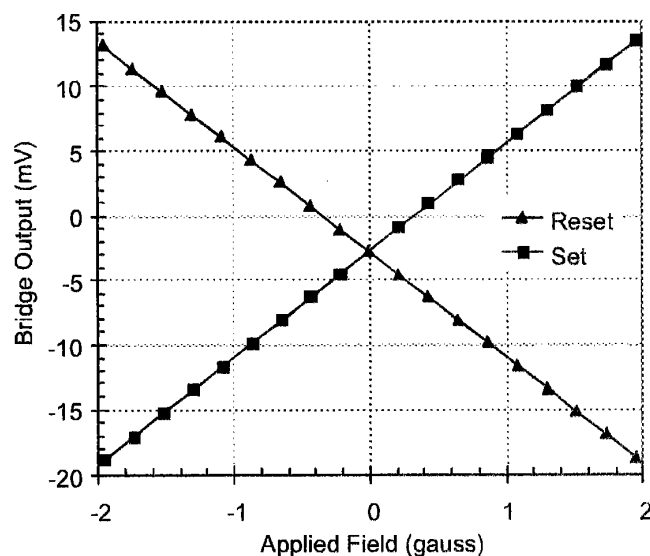
Občutljivost mostiča je izraženo kot $\text{mV/V}/(\text{A/m})$, kjer srednja enota popisuje velikost napajalne napetosti Wheatstonovega mostiča U_B . V primeru, da je $U_B = 5 \text{ V}$ in $3 \text{ mV/V}/(\text{A/m})$ potem bo ojačenje senzorja $15 \text{ mV}/(\text{A/m})$.

AMR senzor je podobno kot vsi ostali magnetni senzorji občutljiv na nezaželena magnetna polja, ki kvarijo merilno točnost. Negativni vpliv je pri AMR še izrazitejši, saj lahko premočno tuje magnetno polje poruši usmerjenost posameznih magnetnih domen s čimer se spremeni vektor magnetne polarizacije \vec{M} . Da se vzpostavijo prvotne magnetne razmere, je okoli senzorja nameščeno krmilno navitje. Z močnim, kratkotrajnim magnetnim impulzom jakosti od $60 \cdot 10^{-4} \text{ T}$ do $100 \cdot 10^{-4} \text{ T}$, povzročenim s krmilnim navitjem, se naključno orientirane magnetne domene ponovno usmerijo v vzdolžni osi senzorja. Na ta način je dosežena odlična ponovljivost izhodne napetosti senzorja, kljub morebitnemu razmagnetenju senzorja v močnem (kratkotrajnem) tujem polju.



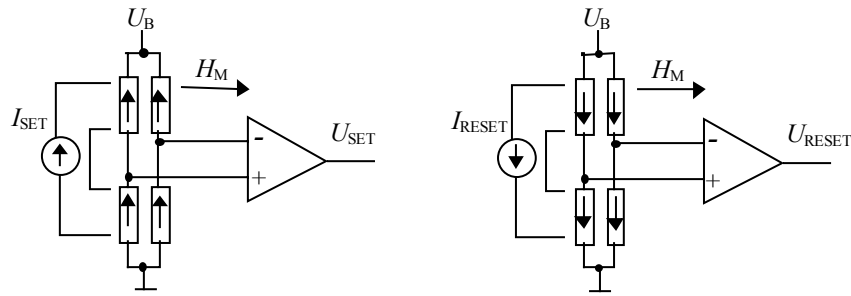
Slika 6: Orientiranje magnetnih domen s krmilnim SET ali RESET impulzom

S pomočjo magnetilnega navitja je možno senzor namagnetiti v obeh vzdolžnih smereh, kar se s pridom uporablja pri kompenzaciji izhodne preostale (offset) napetosti sensorja. Značilno statično karakteristiko magnetnega sensorja v obliki Wheatstonovega mostiča, ki podaja linearno odvisnost izhodne napetosti od jakosti zunanjega magnetnega polja, kaže slika 7.



Slika 7: Statični karakteristiki AMR sensorja v linearnem delu krivulje (magneteno s SET in RESET krmilnim impulzom)

Na grafu 7 sta združeni dve statični karakteristiki, ki ustrezata magnetenju s SET in RESET krmilnim impulzom. Ker je občutljivost sensorja neodvisna od smeri polarizacije (0 ali 180) sta strmini obeh statičnih krivulj enaki, a premaknjeni iz izhodišča za enako preostalo napetost.



Slika 8: Magnetenje s Set in Reset impulzom

Metode za odpravo ali zmanjšanje preostale napetosti AMR senzorja

Preostalo napetost AMR senzorja je možno zmanjšati oz. odpraviti na enega izmed štirih načinov.

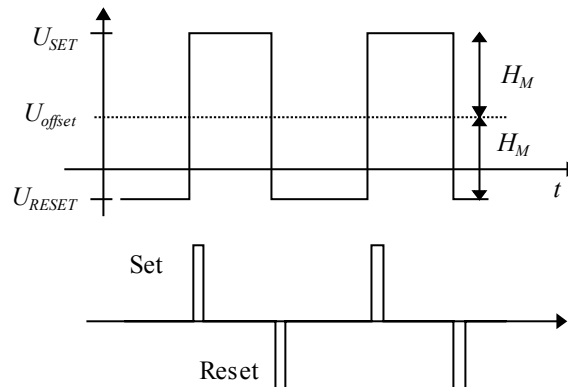
4. **Ročna korekcija preostale napetosti** je na prvi videz najenostavnejša metoda, saj k enemu upor v Wheatstonovem mostiču vežemo vzporedno dodatni upor. Z njim korigiramo izhodno napetost mostiča na vrednost 0 V, kar pa moramo storiti v magnetni komori pri vrednosti polja $B = 0$ T. Takšno opravilo je torej vezano na laboratorijske razmere in je poleg tega tudi visoko intenzivno, saj je upornost dodatnega upora od senzorja do senzorja različna.
5. **Kompensacijsko navitje** je navito tako, da je njegovo magnetno polje usmerjeno v smeri občutljive osi, torej v smeri zunanjega, merjenega magnetnega polja. Namen kompensacijskega navitja je, da s konstantnim enosmernim tokom ustvarimo tako magnetno polje, ki se bodisi prišteva ali odšteva k zunanjemu, da bo izhodna napetost pri $B = 0$ T enaka 0 V. Velikost enosmernege toka moramo zopet določiti v magnetni komori, poleg tega pa je uspešnost kompensacije močno odvisna tudi od stabilnosti tokovnega generatorja enosmernege toka.
6. **Korekcija preostale napetosti s krmilnim navitjem** temelji na numeričnem odštevanju, ki ga izvaja mikrokontroler. Le-ta izmenično generira SET in RESET krmilni signal in v obeh primerih izmeri izhodno napetost mostiča

$$\begin{aligned} U_{SET} &= S \cdot H_M + U_{offset} \\ U_{RESET} &= -S \cdot H_M + U_{offset} \end{aligned}$$

Če enačbi odštejemo, člen U_{offset} odpade,

$$U_{SET} - U_{RESET} = 2 \cdot S \cdot H_M,$$

medtem ko se komponenta preosorazmerna tujemu polju podvoji. Postopek teoretično povsem odpravi temperaturni vpliv izhodne napetosti zaradi spremembe offsetne napetosti. Izničena je tudi preostala napetost instrumentacijskega ojačevalnika.

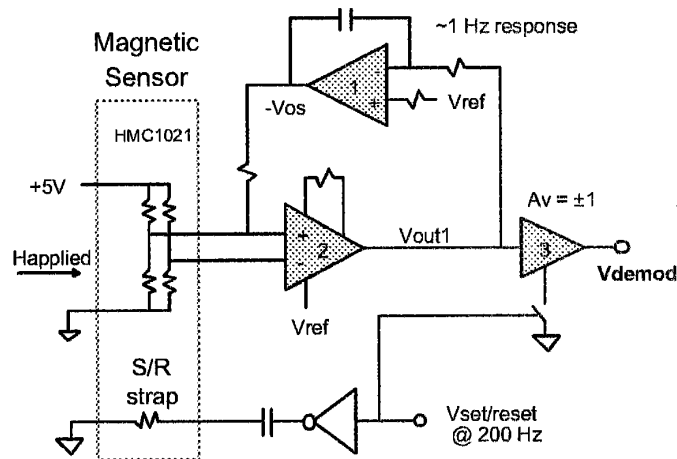


Slika 9: Potek izhodne napetosti senzorja pri izmeničnem magnetenju

Če se želimo izogniti pogostemu magnetenju senzorja, ki je v zgornjem primeru potrebno, saj lahko šele iz obeh meritev izmerimo velikost tujega polja, enačbi () seštejemo. V tem primeru je dobljeni rezultat enak dvojni vrednosti offsetne napetosti, ki jo lahko merimo v daljših časovnih intervalih (5 min), ter tako kompenziramo merilni rezultat.

4. **Kompenzacija preostale napetosti v zaprtozančem sistemu** temelji na modulaciji izhodne napetosti Wheatstonovega mostiča v zaporedje pravokotnih impulzov, ugotavljanju preostale napetosti in ponovni demodulaciji v enosmerni signal. Modulacija vhodnega signala je zopet zasnovana na izmeničnem magnetenju senzorja s SET/RESET signalom s stikalno frekvenco 200 Hz. Če uvodoma predpostavimo, da je povezava med OP1 in neinvertirajočim vhodom OP2 prekinjena, potem je potek izhodne napetosti u_{OUT1} enak tistemu na sliki 9. Njegova vršna vrednost je enaka dvakratni vrednosti merjenega polja z enosmerno komponento, ki ustreza preostali napetosti. Če takšen signal pripeljemo na vhod nizkopasovnega filtra (OP1) z mejno frekvenco 1 Hz bo modulirani signal s frekvenco 200 Hz močno dušen, medtem ko bo izhodna napetost filtra enaka negativni vrednosti enosmerne komponente moduliranega signala, ki ustreza preostali napetosti. Pri sklenjeni negativni veji bo zato preostala napetost na vhodu OP2 izničena, tako da bo imela izhodna napetost u_{OUT1} pravokotni potek z vršno vrednostjo $2H_{appl}$, ki je simetrična glede na U_{ref} (0 V). Takšen signal nato še s pomočjo OP3 demoduliramo v enosmerni signal u_{DEM0D} . Demodulator je zgrajen v obliki ojačevalnika z ojačenjem ± 1 ,

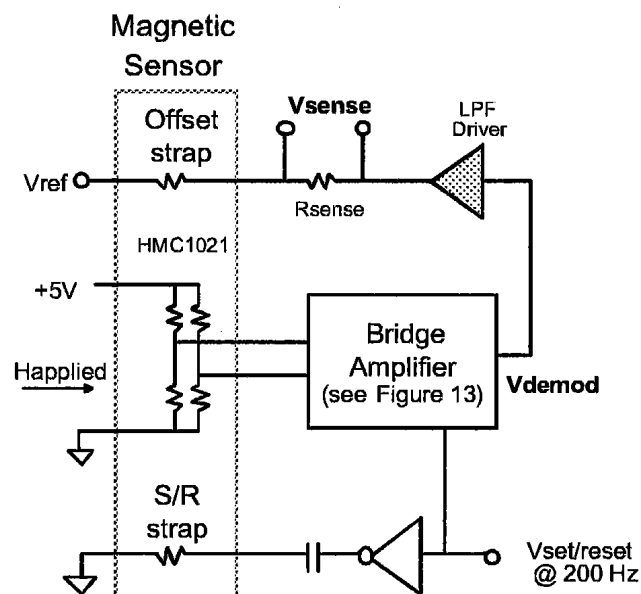
ki je krmiljen sinhrono s krmilnim signalom SET/RESET. Kljub sinhronizaciji lahko izhodna napetost u_{DEMOD} vsebuje motnje v obliki kratkotrajne valovitosti ob vsakem preklopu. V ta namen je smiselno izhodni signal dodatno filtrirati z nizkopasovnim filtrom ($f_{\text{mej}} = 20 \text{ Hz}$).



Slika 10: Kompenzacija preostale napetosti v zaprtozančnem sistemu

Kompenzacijski merilnik magnetnega polja z AMR senzorjem

Shemo kompenzacijskega merilnika kaže slika 11. Vezje je podobno vezju na sliki 10, le da je demodulirani signal preko nizkopasovnega filtra in merilnega upora priključen na kompenzacijsko navitje senzora.



Slika 11: Kompenzacijski merilnik magnetnega polja

Izmerjena napetost u_{DEMOD} je zato premosorazmerna razliki merjenega in kompenzacijskega polja, ki ga generira kompenzacijsko navitje

$$u_{DEMOD} = (H_{appl} - H_{OFF}) \cdot k_1,$$

kjer je k_1 ojačenje AMR senzorja.

Ojačenje negativne povratne veje je določeno kot

$$u_{DEMOD} \cdot k_2 = H_{OFF} \cdot$$

Iz zgornjih enačb izrazimo

$$H_{appl} = \frac{u_{DEMOD}}{k_1} + u_{DEMOD} \cdot k_2 = u_{DEMOD} \cdot (1 + C).$$

Iz izraza vidimo, da večje ko je ojačenje v negativni povratni veji manjša bo demodulirana napetost u_{DEMOD} . V idealnem primeru ($C \rightarrow \infty$) bo le-ta težila k vrednosti nič oz. $H_{appl} = H_{OFF}$. Tok skozi kompenzacijsko navitje bo tedaj premosorazmeren merjeni jakosti magnetnega polja.

Anizotropnost.....pojav, da je kaka snovna količina odvisna od smeri

Viri: A new perspective on magnetic field sensing (www.ssec.honeywell.com)

Aplikacije

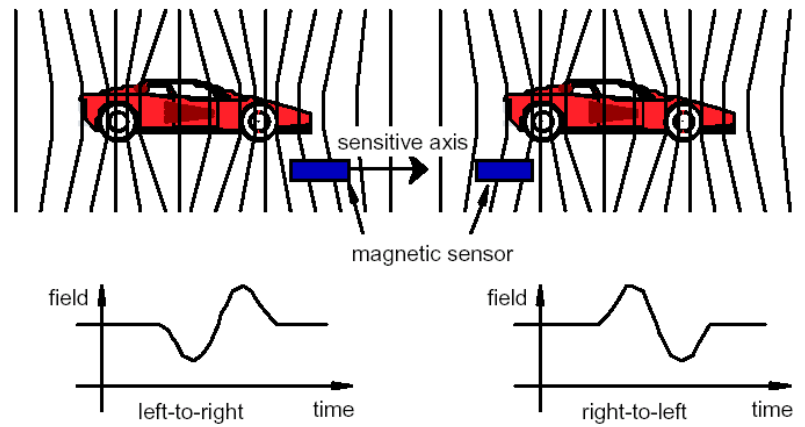


Figure 11–Direction sensing for vehicles driving over magnetic sensor.

