

Snímače magnetického pole

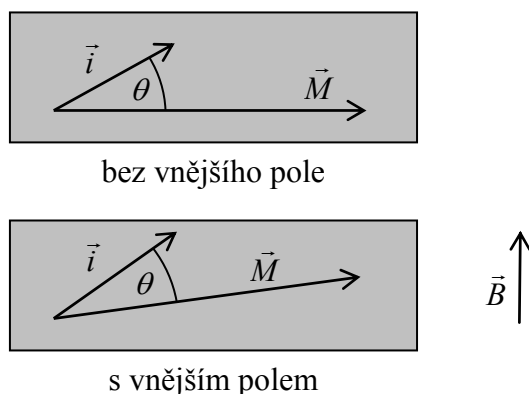
Zdeněk Bochníček*, katedra obecné fyziky, Přírodovědecká fakulta MU

Jednoduché snímače magnetického pole člověk používá již více než 2 000 let. První aplikace – orientace a navigace pomocí detekce zemského magnetického pole – však zůstala po tisíciletí jedinou. Nebývalý rozvoj rozličných detektorů magnetického pole nastal až v posledních desetiletích. Nyní jsou k dispozici čidla pracující na více než deseti různých fyzikálních principech, které umožňují měřit magnetické pole v rozsahu 10^{-15} – 10^4 T. (Pro srovnání: zemské magnetické pole při povrchu Země je asi $6 \cdot 10^{-5}$ T). Možná se zdá, že možnosti aplikačního využití magnetických senzorů jsou jen velmi omezené. Opak je pravdou. Ve většině aplikací je magnetické pole pouze prostředníkem pro detekci jiné fyzikální veličiny: polohy, rychlosti, teploty, tlaku, elektrického proudu apod.

V následujícím textu si popíšeme fyzikální principy některých snímačů magnetického pole a uvedeme několik příkladů praktických aplikací.

ANIZOTROPNÍ MAGNETOREZISTIVITA (ANISOTROPIC MAGNETORESISTIVITY, AMR)

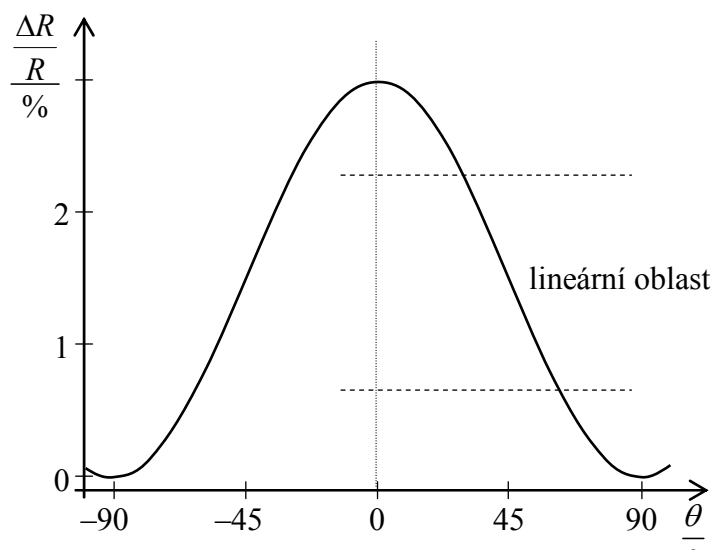
Magnetoresistivitu – změnu odporu s magnetickým polem – poprvé pozoroval William Thomson (lord Kelvin) již v roce 1856. Trvalo však více než sto let, než mohl být tento efekt prakticky využit. V případě tzv. anizotropní magnetoresistivity souvisí změna odporu se změnou úhlu θ mezi vektorem magnetizace \vec{M} a směrem proudové hustoty \vec{i} , protékající materiálem (viz obr. 1). Měrný odpor je největší, pokud elektrický proud teče ve směru magnetizace \vec{M} ; příčinou je vyšší pravděpodobnost rozptylu elektronů pohybujících se tímto směrem. Ve směru kolmém k \vec{M} je naopak odpor nejmenší.



Obr. 1: Jev anizotropní magnetoresistivity. Elektrický odpor materiálu závisí na úhlu mezi vektorem magnetizace a směrem proudu. Při nulovém vnějším poli je směr vektoru magnetizace dán remanentní magnetizací (horní obrázek), při vložení do vnějšího magnetického pole se směr vektoru magnetizace změní (dolní obrázek).

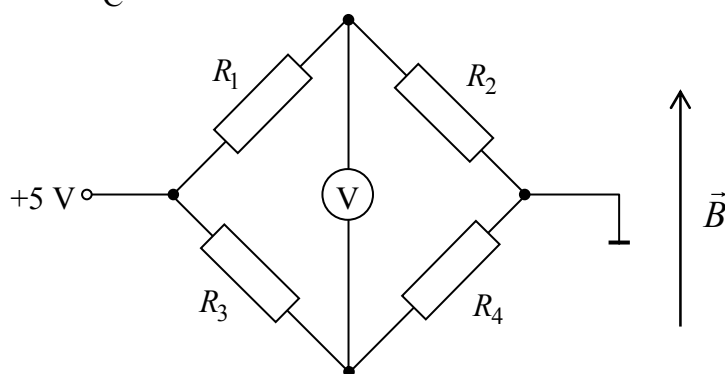
Typická závislost relativní změny odporu $\frac{\Delta R}{R}$ je na obr. 2. Maximální hodnoty $\frac{\Delta R}{R}$ dosahují 2–3 %. Je výhodné využívat oblasti kolem $\theta = 45^\circ$, kde je magnetoresistivní odezva přibližně lineární. AMR snímače pracují s rozsahu 10^{-10} – 10^{-3} T.

zboch@physics.muni.cz



Obr. 2: Závislost změny elektrického odporu na úhlu mezi vektorem magnetizace a směrem proudu.

Vlastní čidlo je tvořeno tenkou vrstvou slitiny permalloy, deponované na křemíkovém substrátu. Permalloy (78,5 % Ni, 18 % Fe, 3% Mo a 0,5 % Mn) má vysokou permeabilitu a malou hysterzezi. Kovová magnetická vrstva ve tvaru úzkého dlouhého pásku je již při výrobě trvale zmagnetována tak, že vektor magnetizace je rovnoběžný s delší stranou pásku (tedy vodorovně na obr. 1 a 4). Toho je možné dosáhnout přítomností silného magnetického pole při depozici tenké vrstvy. Jelikož změna odporu $\frac{\Delta R}{R}$ je relativně malá, zvyšuje se citlivost snímače tím, že se použijí čtyři identické pásky zapojené do Wheatstoneova můstku (obr. 3). Odporů R_1 , R_3 a R_2 , R_4 tvoří dvě dvojice s úhly $\theta_1 = \theta_4 = 45^\circ$ a $\theta_2 = \theta_3 = -45^\circ$. V této konfiguraci je současně kompenzována teplotní závislost měrného odporu permalloye, která je poměrně značná: $0,5 \frac{\%}{^\circ\text{C}}$.

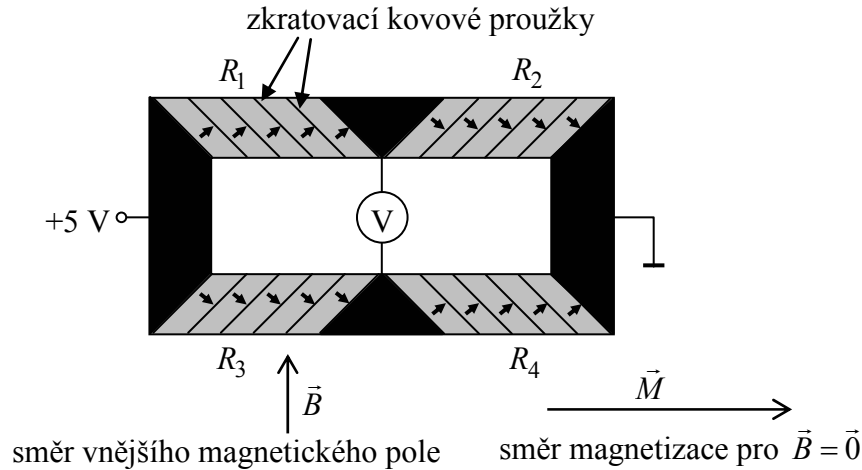


Obr. 3: Uspořádání snímačů do Wheatstoneova můstku.

Geometrické uspořádání čtveřice čidel ve snímači je na obr. 4. Ve stavu bez vnějšího magnetického pole je permalloy zmagnetován podél delší strany pásků. Při zapnutí vnějšího pole (s intenzitou například svisle směrem vzhůru) se vektor magnetizace vychýlí dle obr. 1. Tím se úhel mezi směrem proudu a magnetizací pro odpory R_1 a R_4 zmenší a pro odpory R_3 a R_2 zvětší. Rovnováha můstku se poruší a voltmetr ukáže výchylku.

Zajímavě je vyřešeno nastavení sklonu směru protékajícího proudu a vnějšího, měřeného magnetického pole. Na povrchu permalloyové vrstvy jsou vytvořeny tenké kovové proužky

z dobře vodivého kovu (např. hliníku nebo zlata), které jsou orientované pod úhlem 45° od směru vnějšího magnetického pole. Tyto proužky tvoří ekvipotenciální plochy, mezi kterými je přibližně homogenní elektrické pole, jehož intenzita je kolmá na delší stranu proužků (podobně jako intenzita pole v deskovém kondenzátoru). Elektrický proud pak kopíruje směr intenzity elektrického pole a svírá tedy s měřeným magnetickým polem požadovaný úhel 45° .



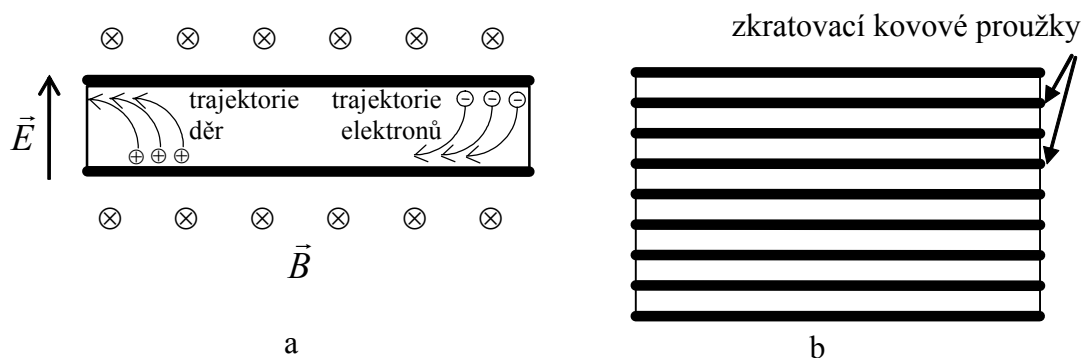
Obr. 4: *Uspořádání permalloyových pásků ve snímači (šedé plochy) se zapojením do Wheatstoneova můstku. Požadovaný směr průtoku elektrického proudu vzhledem k měřenému magnetickému poli (malé šipky) zajišťují kovové zkratovací proužky (černé pásy).*

Pro správnou funkci snímače je nutné, aby permalloy byl trvale zmagnetován podél delší strany pásků. Rušivé vnější magnetické pole může ovšem magnetizaci slitiny pozměnit. Stane-li se tak, je třeba původní magnetizaci obnovit s použitím silného vnějšího magnetického pole. Pokud senzor není vystaven rušivému poli, magnetizace zůstane nezměněna velmi dlouho (řadu let).

Velkou výhodou těchto snímačů je skutečnost, že mohou být vytvořeny na křemíkovém substrátu. Lze je tedy přímo začlenit do integrovaných obvodů, které slouží pro zpracování a vyhodnocení signálů, což velmi snižuje cenu těchto snímačů. Malé rozměry, vysoká citlivost, odolnost proti rušivým vlivům a spolehlivost, to vše předurčuje AMR snímače k řadě aplikací a v daném rozsahu magnetických polí jen stěží nachází konkurenty.

MAGNETOREZISTORY

Podobně jako předchozí snímače i magnetorezistory jsou součástky, které ve vnějším magnetickém poli mění elektrický odpor. Fyzikální princip děje je však zcela odlišný. Magnetické pole působením Lorentzovy síly zakřivuje dráhu nositelů náboje v látkách, to prodlužuje jejich dráhu, a tak zvyšuje elektrický odpor. Změna elektrického odporu je tím větší, čím je větší pohyblivost nositelů proudu. Proto se nejčastěji používají polovodivé materiály s vysokou pohyblivostí jako InSb a GaAs. Principiální schéma je na obr. 5a. Je podstatné, aby šířka polovodivé oblasti byla mnohem větší než její délka. Pak nedochází k významnému hromadění nositelů proudu u okrajů oblasti. Tento jev (vznik Hallova napětí, viz dále) by nežádoucím způsobem kompenzoval magnetickou sílu.



Obr. 5: Magnetorezistor. Magnetické pole zakřivuje, a tak prodlužuje dráhu nositelů proudu (a). Vlastní snímač je tvořen řadou sériově zapojených elementů (b). Kovové zkratovací pásy na povrchu polovodiče zajišťují potřebný poměr šířky a délky elementů, a tím potlačují nežádoucí vznik Hallova napětí.

Požadujeme-li odpor čidla řádu stovek a tisíců ohmů, musí být čidlo tvořeno úzkým dlouhým páskem s šířkou několika mikrometrů. Tento tvar však nevyhoví dříve zmíněnému požadavku poměru šířky k délce. Proto jsou navíc na jeho povrch deponovány úzké kovové proužky ve směru kolmém ke směru elektrického pole. Proužky tvoří ekvipotenciální plochy a rozdělí tak dlouhý prvek na řadu sériově zapojených elementů, jejichž šířka je větší než délka, tak jak je požadováno (viz obr. 5b).

Magnetorezistory jsou vhodné pro magnetická pole o indukcii desetin až jednotek tesla. Jsou tedy o mnoho řádů méně citlivé než AMR snímače. Na druhé straně v silných magnetických polích může změna odporu dosáhnout až stovek procent.

SNÍMAČE ZALOŽENÉ NA HALLOVĚ JEVU

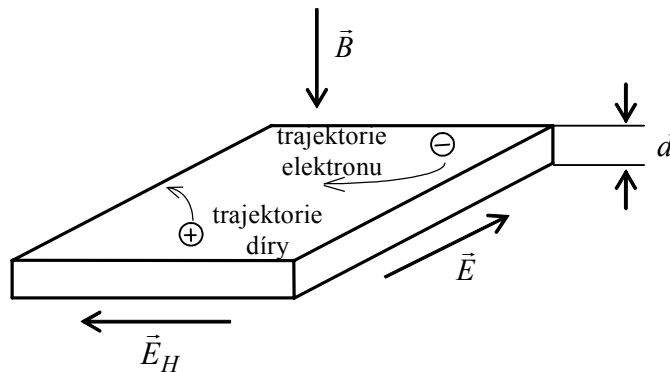
Hallův jev objevil E. Hall v roce 1879, avšak jeho první praktická aplikace spadá až do 50. let 20. století. Masové rozšíření je spojeno s vývojem klávesnice využívající Hallův jev (1968). Hallovy sondy jsou použitelné pro měření magnetických polí s indukcí 10^{-3} – 10^2 T a jejich výhody jsou vysoká spolehlivost a dlouhá provozní doba ($3 \cdot 10^{10}$ operačních cyklů klávesnice), vysoká operační rychlost (více než 100 kHz), široký rozsah pracovních teplot (-40 – 150 °C) a v neposlední řadě také snadná implementace do součástek vyrobených technologií integrovaných obvodů.

Podobně jako u magnetorezistorů je pro vznik Hallova jevu podstatná Lorentzova síla působící na pohybující se náboje (viz obr. 6). Nositelé náboje jsou vychylovány kolmo na směr elektrického proudu, a tím se jejich koncentrace na jedné straně destičky zvyšuje. Je zřejmé, že oba typy nositelů – elektrony a díry – jsou vychylovány na stejnou stranu destičky. V nevlastním polovodiči nebo kovu, kde převládá jeden typ nositelů náboje, tak dochází ke spádu koncentrace náboje ve směru kolmém na intenzitu vnějšího elektrického pole \vec{E} . Tím vzniká příčné elektrické pole \vec{E}_H a s ním související tzv. Hallovo napětí U_H . V rovnovážném stavu silové působení Hallova napětí právě kompenzuje magnetickou sílu a přerozdělování náboje již neprobíhá. Relativně jednoduše lze pro Hallovo napětí odvodit vztah

$$U_H = R \cdot \frac{I \cdot B}{d},$$

kde I je elektrický proud protékající vodičem, B velikost indukce vnějšího magnetického pole a d tloušťka destičky (měřeno ve směru vektoru magnetické indukce). R je materiálová konstanta – tzv. Hallova konstanta.

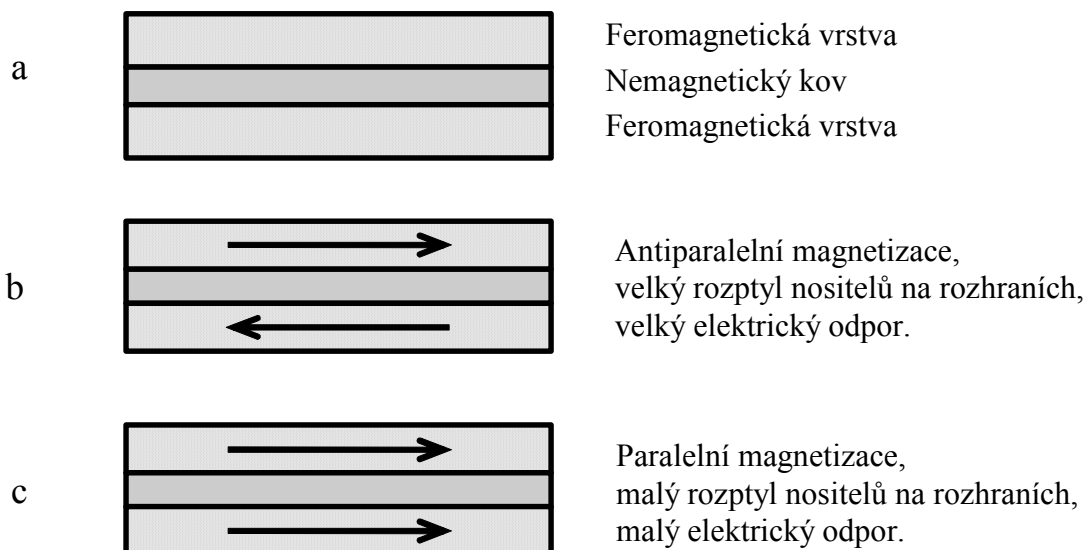
Vidíme tedy, že Hallovy snímače a magnetorezistory jsou založeny na stejném fyzikálním principu. V případě magnetorezistorů je však vznik Hallova napětí nežádoucí a je potlačen vhodnou geometrií vodiče (za pomoci zkratovacích proužků).



Obr. 6: Hallův jev. Magnetické pole zakřivuje trajektorie nositelů proudu. V kovech a nevlastních polovodičích tak vzniká příčné elektrické pole – Hallovo napětí. Směr příčného elektrického pole \vec{E}_H odpovídá polovodiči typu N nebo kovu.

GIGANTICKÁ MAGNETOREZISTIVITA (GIANT MAGNETORESISTIVITY, GMR)

Tento jev byl objeven teprve nedávno (1988) a nastává ve speciálně připravených velmi tenkých vrstevnatých strukturách. Příklad takové struktury je na obr. 7a. Je tvořena dvěma feromagnetickými vrstvami, které jsou oddělené tenkou vrstvou nemagnetického vodiče. Krajní feromagnetické vrstvy mohou být zmagnetovány dvěma způsoby: antiparalelně (obr 7b) nebo paralelně (obr 7c). Elektrony, protékající střední vodivou vrstvou, mají spinový magnetický moment, díky kterému se rozptylují na rozhraní s feromagnetickými vrstvami. Tento rozptyl obecně zvyšuje elektrický odpor a je větší v případě, kdy jsou magnetické vrstvy zmagnetovány antiparalelně (uspořádání b na obr. 7). Pro to, aby rozptyl na rozhraních významně ovlivnil vodivost střední vrstvy, je nutné, aby tato vrstva byla velmi tenká – méně než 10 nm.

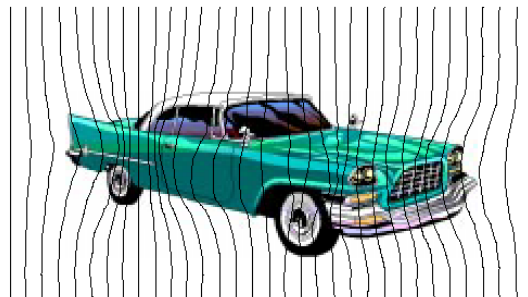


Obr. 7: Gigantická magnetorezistivita, GMR. Rozptyl nositelů proudu na rozhraních feromagnetických a nemagnetických vrstev je ovlivněn magnetizací krajních feromagnetických vrstev.

Jeden z možných způsobů činnosti je následující. Střední vrstvou protéká proud ve směru kolmém na nákresu na obr. 7. Ukazuje se, že hustota proudu několika $\frac{\text{mA}}{\mu\text{m}^2}$ je nutná k tomu, aby se v magnetickém poli vodiče protékaného proudem zmagnetovaly krajní feromagnetické vrstvy antiparalelně (srovnejte s magnetickým polem kruhového vodiče). Vložíme-li tuto strukturu do vnějšího magnetického pole dostatečné velikosti (indukce nejméně 10^{-5} T) s vektorem indukce ve směru elektrického proudu (kolmo k nákresu na obr. 7), dojde ke změně magnetizace feromagnetických vrstev na paralelní podél směru proudu, a tedy ke snížení elektrického odporu střední vrstvy. V tomto uspořádání dosahuje relativní změna elektrického odporu hodnot 5–10 %.

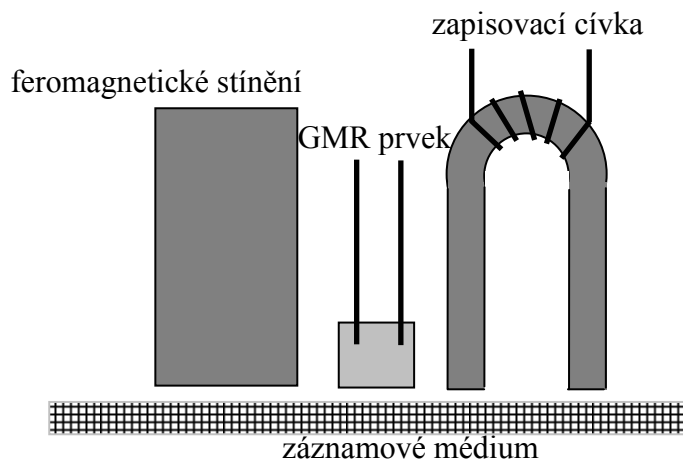
Technologií fotolitografie je možné vyrobit jeden GMR senzor o velikosti $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$.

PŘÍKLADY POUŽITÍ MAGNETICKÝCH SENZORŮ



Obr. 8: Deformace zemského magnetického pole v blízkosti automobilu.

Snímače magnetického pole je samozřejmě možné použít všude tam, kde potřebujeme měřit magnetické pole. Typickým příkladem jsou elektronické kompas, ve kterých AMR senzory měří magnetické pole Země. Tyto snímače jsou tak citlivé, že mohou měřit nejen velikost a směr místního magnetického pole, ale také deformace tohoto pole způsobené blízkostí větších feromagnetických objektů. Je například možné zjistit přítomnost automobilu až do vzdálenosti 15 m (viz obr. 8). Toho lze využít například pro automatický systém nalezení volných míst ve velkokapacitních parkovacích garážích. Použijeme-li dvě čidla umístěná v jisté vzdálenosti od sebe, můžeme měřit průjezd vozidel s určením směru jízdy a rychlosti.



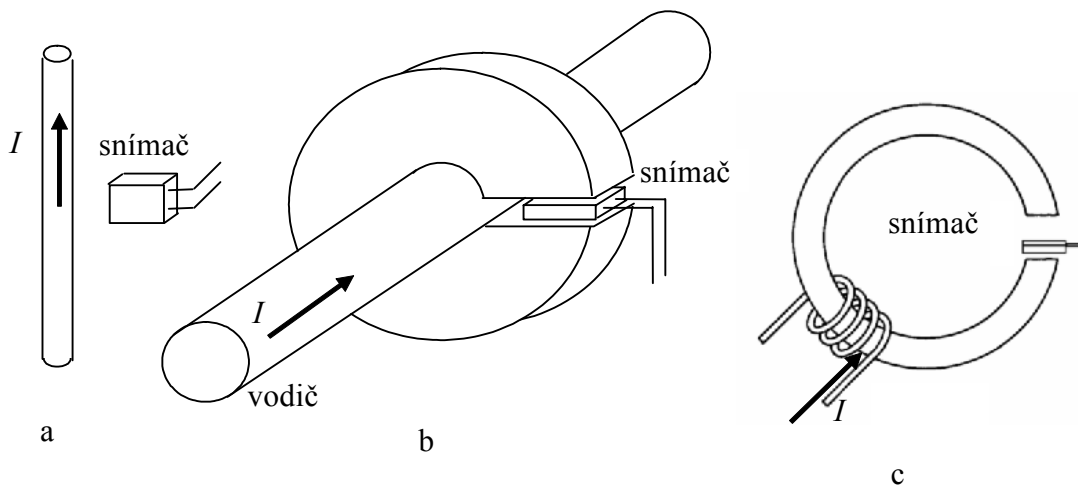
Obr. 9: Integrovaný magnetorezistivní zapisovací/čtecí element pevného disku. Pro zápis slouží klasická cívka, čtení zajišťuje magnetorezistivní (GMR) prvek.

Velké rozšíření v poslední době zaznamenaly také magnetorezistivní čtecí hlavičky pro pevné disky v počítačích. Starší konstrukce využívaly pro čtení magnetického záznamu jev elektromagnetické indukce. V moderních hlavičkách je čtení zajištěno pomocí GMR prvku (viz obr. 9).

Možnosti použití snímačů magnetického pole jsou však mnohem širší. Ukážeme si je na několika příkladech.

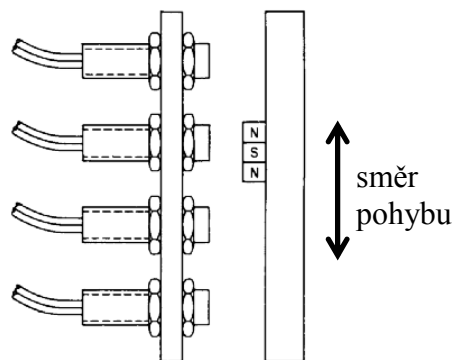
MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO PROUDU

Každý vodič, kterým protéká elektrický proud, budí ve svém okolí magnetické pole, jehož intenzita je přímo úměrná velikosti proudu. Umístíme-li tedy do definované vzdálenosti od vodiče lineární snímač magnetického pole, pak výstup ze snímače je přímo úměrný velikosti proudu (obr. 10a). Feromagnetickým prstencem je možné zesílit magnetické pole a tedy zvýšit citlivost čidla (obr. 10b a 10c). Měřící rozsah takových čidel se pohybuje od stovek miliampér do tisíců ampér, uživatelé je znají pod jménem klešťové ampérmetry.



Obr. 10: Měření proudu magnetickým snímačem. a: Snímač je pouze přiložen k vodiči. b a c: Magnetické pole je zesíleno prstencem z feromagnetického materiálu.

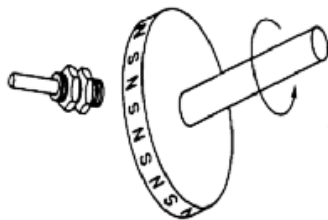
MĚŘENÍ POLOHY, RYCHLOSTI A NÁKLONU



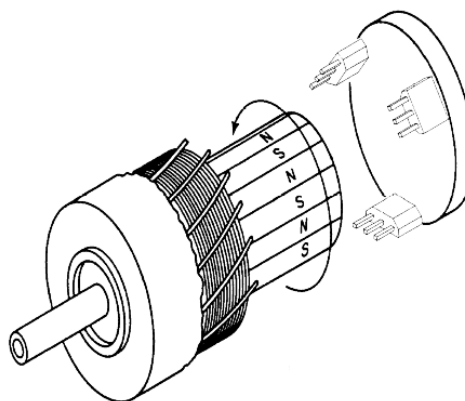
Obr. 11: Snímač polohy. Magnetické pole dvojice magnetů je měřeno čtyřmi Hallovými sondami.

Pokud vytvoříme v měřeném prostoru definované magnetické pole, můžeme měřením jeho intenzity získat informace o poloze čidla v prostoru. Příklad takového uspořádání je na obr. 11. Takto lze měřit vzájemný posuv s přesností až 0,05 mm. Podobně je možné realizovat i měření náklonu, zde dokonce s využitím magnetického pole Země. Na obr. 12 je schéma čidla na mě-

ření úhlové rychlosti otáčení. Na podobném principu pracuje i elektronický komutátor pro stejnosměrné elektrické motory (viz obr. 13).



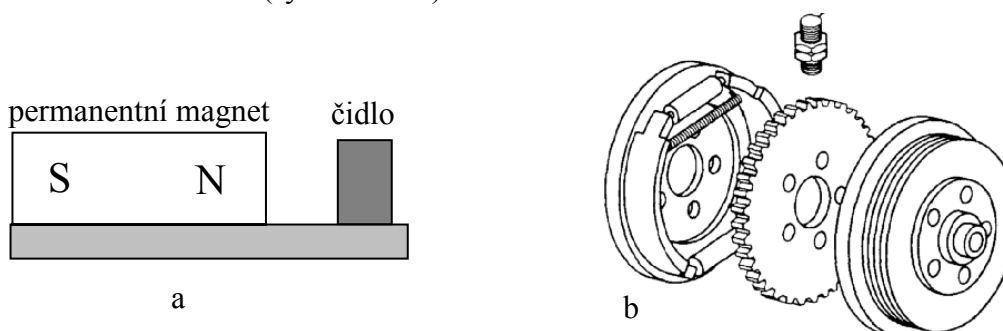
Obr. 12: Měření úhlové rychlosti otáčení.



Obr. 13: Elektronický komutátor pro stejnosměrné elektromotory.

MĚŘENÍ PŘÍTOMNOSTI FEROMAGNETICKÉHO MATERIÁLU

Pevnou součástí snímače je kromě čidla i permanentní magnet, který vytváří magnetické pole měřené vlastním snímačem (obr. 14a). Je-li v blízkosti snímače feromagnetický materiál, změní se průběh magnetických indukčních čar a tedy i magnetické pole v místě magnetického čidla. Takto lze velmi jednoduše měřit frekvence otáček ozubených kol (snímač registruje průchod jednotlivých zubů), řemenic (snímač upevníme do těsné blízkosti vhodného výstupku, například šroubu), hřídelí apod. Na obr. 14b je použit magnetický snímač na detekci zablokování kol automobilu (systém ABS).



Obr. 14a: Zdroj magnetického pole a čidlo tvoří kompaktní jednotku, která detekuje blízkost feromagnetického materiálu. b: Použití snímače pro detekci zablokování kol automobilu systému ABS.

LITERATURA

- [1] Halliday D., Resnick R., Walker J.: *Fyzika, Část 3, Elektřina a magnetismus*. Vutium, Brno 2000.
- [2] <<http://bookmarkphysics.iop.org/fullbooks/0750307021/tumanskich01.pdf>>
- [3] <<http://www.volny.cz/vopalem/MagSen04.pdf>> *Magnetorezistivní senzory* (česky).
- [4] <<http://www.autex.spb.ru/download/wavelet/books/sensor/CH48.PDF>>

Obrazové materiály byly připraveny částečně s použitím www-stránek firmy Honeywell (<http://www.honeywell.com/>).