

3 Snímače elektrických veličin



Čas ke studiu: 100 minut



Cíl:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- Pochopíte základní principy převodníků elektrických veličin.
- Porozumíte Hallovu jevu
- Budete umět tyto obecné poznatky aplikovat při praktických měřeních
- Budete schopni posoudit vhodnost určitého převodníku pro danou aplikaci
- Dozvíte se o výhodách a nevýhodách jednotlivých typů převodníků



Výklad

3.1. Měřicí převodníky elektrických veličin

U elektrických měřicích přístrojů můžeme upravovat velikost měřené veličiny tak, aby ji měřicí ústrojí mohlo bez poškození a s dostatečnou přesností měřit, nebo můžeme převádět jednu elektrickou veličinu na elektrickou veličinu jiného druhu.

Měřicí převodníky se používají pro měření základních elektrických veličin, které převádějí na výstupní analogové signály. Tyto signály je možno použít jak pro indikaci v místě měření, tak pro průmyslové měření a regulaci ve vzdálených velínech. Jsou konstruovány podle nejnovějších bezpečnostních předpisů EN 61010-1¹, ustanovení o shodě (CE) a jsou zkoušeny proti rušení.

V praxi se využívá především těchto měřicích převodníků:

(popsat klešťový ampérmetr na bázi měřicího trafo proudu a rozdíl s Hallovou sondou)

- klešťový ampérmetr využívající principu Hallova jevu – **Hallovy sondy** pro měření proudů, nebo klešťový ampérmetr pracující na principu měřicího transformátoru proudu,
- klešťový transformátor pracující na principu měřicího transformátoru proudu

1 ČSN EN 61010-1 - Bezpečnostní požadavky na elektrická měřicí, řídicí a laboratorní zařízení - Část 1: Všeobecné požadavky

- přístrojové **měřicí transformátory** proudu a napětí,
- **děliče napětí** (odporové a kapacitní),
- impedanční dělič proudu,
- **Rogowského cívka** pro měření střídavých proudů

3.2. Hallova sonda

Hallovovy sondy (generátory) se používají zejména pro měření magnetické indukce, ale své použití našly i při měření proudu. Dosažitelná přesnost je asi 1 %. Přístroje lze použít pro měření proudu do kmitočtu asi 25 kHz.

Pro měření stejnosměrného i střídavého proudu lze využít i Hallova jevu, viz. obrázek níže. Vložíme-li destičku polovodiče do magnetického pole a necháme-li jí příčně protékat stejnosměrným proudem, objeví se na opačných hranách destičky tzv. Hallovo napětí, jehož velikost je dána vztahem:

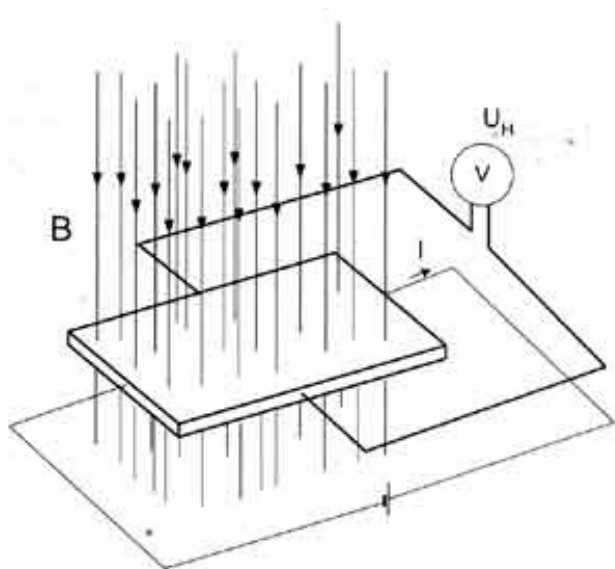
$$U_H = k \cdot I \cdot B \quad (V ; m^2 \cdot s^{-1} \cdot A^{-1}, A, T)$$

kde:

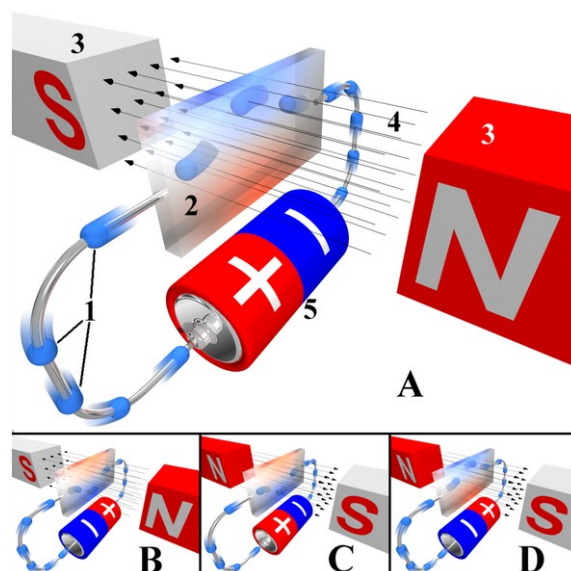
k - konstanta závislá na materiálu, tloušťce a struktuře polovodičové destičky,

I - stejnosměrný proud protékající destičkou,

B - indukce magnetického pole, v němž se destička nachází.



Obr. 1: Princip Hallova jevu



Obr. 2: 1-Elektrony, 2-Polovodičová deska, 3-Magnety, 4-Magnetické pole, 5-Zdroj energie (proudu)

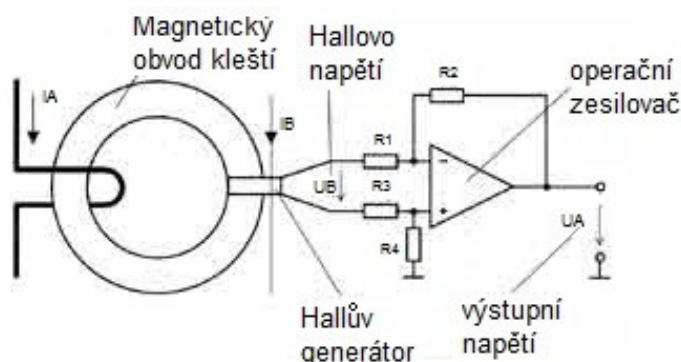
Popis obrázku 2: A-dostává předmět negativní náboj symbolizovaný modrou barvou a kladný náboj symbolizovaný barvou červenou.

B a C - se elektrický proud obrací, což způsobuje změnu polarizace.

D -Změna proudu i magnetického pole opět vytvoří záporný náboj v horní části předmětu.

Hallovy sondy (Hallovy generátory) se v současné době používají zejména pro měření magnetické indukce, ale své použití našly i při měření proudu.

Praktické řešení zapojení Hallovy sondy pro měření proudu je na obrázku 3. Vodič, kterým protéká měřený proud I_A (je jedno, jestli je stejnosměrný nebo střídavý) obemkneme kleštěmi magnetického obvodu (magnetický obvod je podobný kleštím běžných klešťových ampérmetrů). Ve vzduchové mezeře je zasunut Hallův generátor, kterým protéká řídicí stejnosměrný proud I_B . Současně s velikostí měřeného proudu I_A roste i velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře a tedy i jí odpovídající Hallovo napětí U_B . Toto napětí se zesiluje pomocí operačního zesilovače na výstupní napětí U_A . Velikost napětí U_A je přímo úměrná velikosti měřeného elektrického proudu I_A .



Obr. 3: Principiální schéma zpracování signálu z Hallova generátoru

Tímto způsobem lze tedy snadno měřit efektivní hodnoty periodických i neperiodických střídavých proudů i proudy stejnosměrné. Dosažitelná přesnost je asi 1% přístroje, lze použít pro měření proudu do kmitočtu asi 25 kHz.

Klešťové ampérmetry s Hallovým generátorem lze použít pro měření proudů 1 mA až 1 MA. Výstup přístrojů bývá výhradně v digitální formě, některé přístroje však mívají i analogový výstup pro připojení osciloskopu (chceme-li zobrazit časový průběh měřeného proudu). Dá se předpokládat, že tyto přístroje v budoucnosti vytlačí klasické klešťové ampérmetry.



Obr. 4: Praktické využití Hallova jevu u klešťového ampérmetru

Dalším typickým zástupcem převodníku využívajícího Hallova jevu je LEM čidlo.

Toto čidlo se používá pro průmyslové aplikace, kdy je čidlo namontováno přímo do systému, např. na desku plošných spojů.

1. Výhodou je izolované měření proudu a napětí s okamžitým proudovým nebo napěťovým výstupem. Možnost měření proudu od 0,1 do 20.000 A a to třemi způsoby, bezkontaktně, s integrovaným vodičem, nebo tzv. Clip-on měření.
2. Měření širokého rozsahu napětí od 10 V do 6400 V.
3. Výhodou je velká přesnost těchto čidel.



Obr. 5: LEM čidlo pro instalaci na desku plošných spojů



Obr. 6: LEM čidlo pro připojení přes BNC konektor, například k osciloskopu

Praktické využití, výhody, nevýhody a porovnání Hallový sondy

Nejčastější aplikaci Hallový sondy použité jako měřicí převodník elektrických veličin je klešťový ampérmetr. Ten je využíván pro diagnostické a laboratorní úkoly. Jejich výhodou je možnost měření stejnosměrné složky a mají velký frekvenční rozsah.

Lze je použít oproti měřicímu transformátoru i pro měření velkých stejnosměrných proudů.

Nevýhodou je oproti měřicímu transformátoru proudů nižší přesnost ve srovnatelné cenové hladině.

3.3. Měřicí transformátory

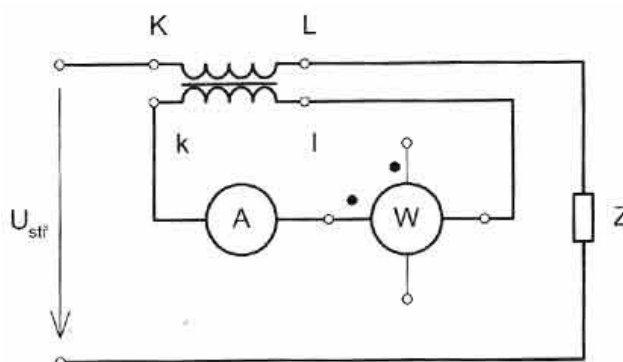
Základní dělení měřících transformátorů je na měřicí transformátory napětí a měřicí transformátory proudu.

Měřicí transformátory slouží ke snížení či zvýšení proudu a napětí. Ve většině případů však ke snížení na jednotnou hladinu (1 nebo 5 Ampér, resp. 100 Voltů), na kterou je přizpůsobena většina komerčních měřících přístrojů a nebo elektrických ochran.

Jelikož transformátor pracuje na principu kolísající (střídavé) magnetické indukce, lze jej použít **pouze** ve **střídavých obvodech** a většinou pro sinusové průběhy.

□ Měřicí transformátory proudu

Tyto transformátory se používají ke změně rozsahů (zvětšení, někdy i zmenšení) střídavých ampérmetrů. Zapojení do obvodu se provádí podle obrázku. Primární vinutí se připojí do série se zátěží, kterou protéká měřený proud a na sekundární vinutí měřicího transformátoru se připojují jednotlivé přístroje (ampérmetr, proudová cívka wattmetru, elektroměr, ...) sériově.



Obr. 7: Schéma zapojení měřicího transformátoru proudu



Obr. 8: Možnosti konstrukce měřicích transformátorů proudu

Sekundární obvod měřicích transformátorů proudu nesmí být nikdy rozpojen. Připojované měřicí přístroje (tzv. břemeno) musí mít nízkou impedanci, případně bývá sekundární obvod zkratován, abychom mohli připojovat/odpojovat přístroje do sekundárního proudového obvodu.

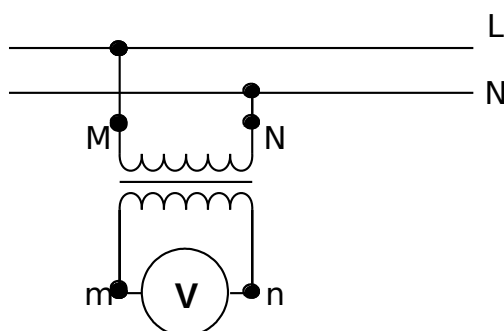
Praktické využití, výhody, nevýhody a porovnání měřicích transformátorů proudu:

U průmyslových aplikací se používají měřicí transformátory. Jejich výhodou je galvanické oddělení a možnost dosažení velkých převodních poměrů. Výhodou měřicích transformátorů proudu oproti klešťovým ampérmetrům je vysoká přesnost a nízká chyba amplitudy a fáze v daném frekvenčním rozsahu 40 až 60 Hz. Pokud by jsme chtěli dosáhnout stejné přesnosti u klešťového ampérmetru cena by dosahovala v současnosti téměř desetinásobku. Jako nevýhoda by se dala označit možnost použití pouze pro střídavý proud.

□ **Měřicí transformátor napětí**

Transformátor sloužící k rozšíření napěťového rozsahu střídavého voltmetru, elektroměru, wattmetru či jiného měřicího přístroje a nebo ochrany.

Primární vinutí se zapojuje místo měřicího přístroje, sekundární vinutí se připojí na měřicí přístroj.



Obr. 9: Schéma měřícího transformátoru napětí

Měřící transformátor napětí se nikdy nesmí zkratovat!

Břemeno transformátoru napětí je admitance Y připojených přístrojů včetně přívodů.

Transformátor je dimenzovaný pro chod na prázdko, nebo na velmi malou zátěž (řádově jednotky VA). Pokud jím začne protékat větší proud, může se poškodit a zároveň ztrácí přesnost. Maximální zátěž je na transformátoru vyznačená.

Transformátor má jednu, nebo několik, primárních cívek a jednu cívku sekundární.

M, N - primární cívka m, n - sekundární cívka.

Výhody nevýhody a porovnání:

Měřící transformátory napětí mají převážně větší počty závitů než měřící transformátory proudu (u nich je primární vinutí tvořeno jedním závitěm nebo několika závitěm).

Protože se kapacity vinutí zvětšují s počtem závitů, je horní mezní frekvence transformátorů napětí nižší než u transformátorů proudu.

Měřené napětí nesmí obsahovat stejnosměrnou složku. Jinak by vznikla stejnosměrná složka magnetizačního proudu, která by nadměrně oteplovala vinutí a výstupní signál by mohl být zkreslený.

Rozsah frekvencí, v němž lze transformátor napětí použít, je menší než u transformátorů proudu. Proto využití transformátorů napětí jako převodníků napětí — napětí pro neharmonické průběhy je možné s uspokojivými výsledky jen při měření malých napětí a při malých přenášených výkonech, kdy rozměry transformátoru mohou být rovněž malé. Frekvenční rozsah takovýchto transformátorů leží přibližně v oblasti akustického pásma.

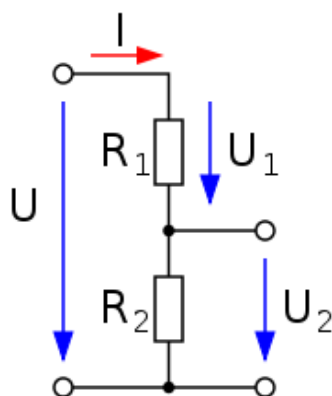
Transformátory napětí nejsou vhodné k přenosu přechodových jevů při větších nárocích na přesnost a na věrnost tvaru přenášeného napětí. Jejich

výhodou je galvanické oddělení a možnost dosažení velkých převodních poměrů.

3.4. Odporový dělič

Odporový dělič jsou v podstatě dva rezistory spojeny v sérii (za sebou), jak je naznačeno na obrázku č. 10.

Velikost střídavého napětí lze změnit pomocí dvojice rezistorů R_1 a R_2 , které tvoří odporový dělič. Rovnice uvedené u obrázku platí pro ideální odporový dělič naprázdno. Protože však rezistory R_1 a R_2 nejsou ideální (mají parazitní kapacity a indukčnosti) a navíc i vstupní impedance zařízení použitého k měření napětí U_2 (osciloskop, voltmetr, nebo vstup měřicí karty) má konečnou velikost a není čistě odporová, závisí obecně přenos děliče na frekvenci. Často je nutné navíc uvažovat i indukčnost přívodů od zdroje napětí k děliči.



Pro napětí U_1 platí vztah:

$$U_1 = U \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Pro napětí U_2 platí vztah:

$$U_2 = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Např. pokud $R_1 = R_2$ pak platí vztah:

$$U_1 = U_2 = \frac{1}{2} \cdot U$$

Poměr výstupního napětí ke vstupnímu se může pohybovat od 0 do 1.

Obr. 10: Principiální schéma odporového děliče



Obr. 11: Příklad měřicího odporového děliče

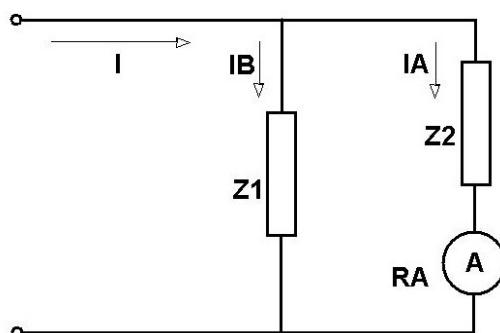
Výhody nevýhody a porovnání odporových děličů:

Jeho výhodou je že jej můžeme použít při měření napětí v širším frekvenčním rozsahu. Mezi další výhody patří **jednoduchost konstrukce** a tedy i nízké pořizovací náklady a také možnost použití jak pro **stejnoseměrná**, tak i pro **střídavá napětí**.

Nevýhodou je vnitřní odpor měřícího přístroje, který může zkreslovat měření, a dále také teplotní závislost a **absence galvanického oddělení**.

3.5. Impedanční dělič proudu

Impedanční dělič proudu (obr. 12) umožňuje měřit ampérmetrem s vnitřním odporem R_A proudy větší, než jaké odpovídají měřicímu rozsahu ampérmetru. Princip tohoto děliče spočívá v tom, že se paralelně k ampérmetru zapojí impedance Z_1 taková, aby jí procházela větší část měřeného proudu I . Zbytek proudu I_A prochází ampérmetrem, s nímž může být v sérii zapojena přídatná impedance Z_2 .



Obr. 12: Princip impedančního děliče proudu

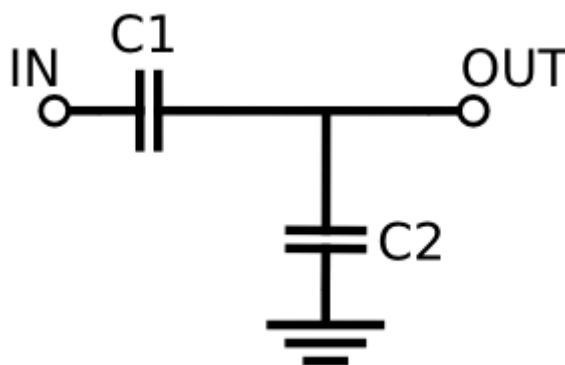
Nejjednodušším případem impedančního děliče proudu je kombinace odporového bočníku a ampérmetru.

3.6. Kapacitní dělič

Kapacitní dělič je obdobou odporového děliče pro střídavé napětí. Pro stejnosměrné napětí je samozřejmě tento dělič nepoužitelný. Výstupní napětí děliče je dáno vztahem:

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

Nejjednodušší zapojení kapacitního děliče je na následujícím obrázku.

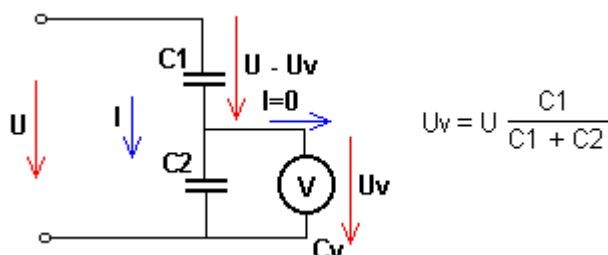


Obr. 13: Schéma kapacitního děliče

Kapacitní děliče napětí se používají převážně u elektrostatických voltmetrů při měření střídavého a pulzujícího vysokého napětí a velmi vysokého napětí.

Kapacitní dělič pracuje následovně: Dáme-li dva kondenzátory s kapacitami C_1 a C_2 do série a připojíme na ně střídavé napětí U , rozdělí se napětí na kondenzátory tak, aby oběma procházel stejný proud.

Je-li na C_1 napětí U_1 a na C_2 napětí U_2 , pak platí vztah:



Obr. 14: Výpočet kapacitního děliče

Praktické využití, výhody a nevýhody Kapacitních děličů:

Představte si obvod, který sníží vstupní napětí na polovinu a výstupní proud vůči vstupnímu zvýší na dvojnásobek. Ten v porovnání s lineárními regulátory zajišťuje mnohem vyšší účinnost, neboť energii nepřeměňuje v teplo. Navíc přináší i nové možnosti v aplikacích, které mají limitovaný výstupní proud.. Mnohé aplikace dnes často používají například operační zesilovače či mikrokontroléry, které pracují s velmi nízkými napětími. V těchto obvodech přináší kapacitní dělič a jeho převod napětí na polovinu až třičtvrtinovou úsporu energie.

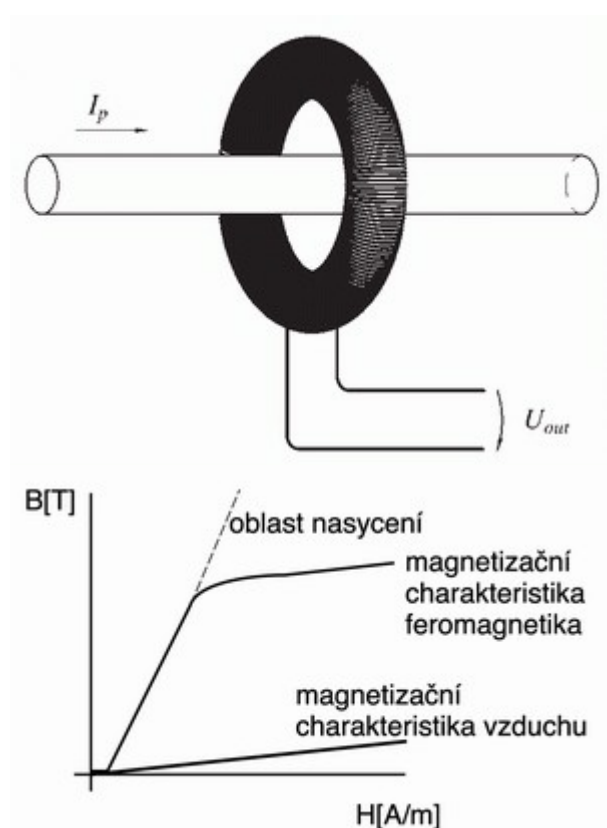


Obr. 15: Příklady měřicích kapacitních děličů pro vysoké (první dva obrázky) a zvláště vysoké napětí (třetí obrázek)

Výhodou kapacitních děličů je, že lze umístit například přímo do kondenzátorových průchodek. Zásadní nevýhoda těchto děličů je, že neoddělují galvanicky měřený obvod s měřicími přístroji a při poruše se může objevit plné napětí na straně měřicích přístrojů a zničit zařízení. Další nevýhody jsou frekvenční závislost a možnost použití pouze pro střídavé a pulzující proudy.

3.7. Rogowského cívka

Rogowského cívka je přesný lineární senzor proudu pro přesné měření ve velkém rozsahu. Prakticky jde o toroidní cívku bez železného jádra (vzduchovou cívku) umístěnou kolem primárního měřeného vodiče stejným způsobem jako sekundární vinutí měřicího proudového transformátoru. Na rozdíl od něj však výstupní signál z Rogowského cívky není proud, ale napětí. I když magnetizační křivka feromagnetického materiálu listěného jádra umožňuje navrhnout proudový transformátor tak, aby pracoval již při malých protékaných prouděch, celková charakteristika je ve velkém rozsahu díky nasycení magnetického obvodu výrazně nelineární. Naproti tomu magnetizační charakteristika vzduchového jádra Rogowského cívky je lineární v širokém rozsahu proudů (intenzity mag. pole H) (viz obr. níže). Výsledný signál, který reprodukuje aktuální časový průběh tvaru vlny primárního proudu, se získá integrací získaného napěťového signálu. [7]

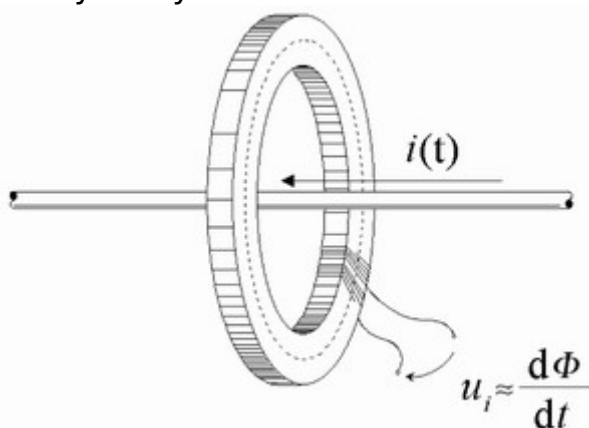


Obr. 12: a) aplikace Rogowského cívky

b) porovnání magnetizačních charakteristik

Princip Rogowského cívky

Rogowského cívka jako měřicí prvek měří změny proudu ve sledovaném vodiči díky indukovanému napětí ve vodiči cívky. Princip je tak podobný jako u běžného transformátoru. To znamená, že střídavý proud sledovaného vodiče vytváří kolem sebe střídavé magnetické pole, které způsobí indukci napětí ve vodiči toroidní vzduchové (Rogowského) cívky. Výsledné napětí je tak úměrné změně magnetického toku a tedy i hodnotě střídavého proudu, který ho vyvolal.



Obr. 13: Princip Rogowského cívky

Z pohledu magnetického obvodu je cívka s měřeným vodičem spojena vzájemnou induktivní vazbou M . Výstupní napětí cívky je tak definováno následujícím vztahem:

$$U_{\text{výst}} = M \cdot \frac{dI}{dt}, \text{ nebo } U_{\text{výst}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I \cdot M$$

kde M je vzájemná indukčnost, I je měřený proud a f je frekvence.

V praxi jsou cívky obvykle jednotlivě kalibrované, aby měli přesnou vzájemnou indukčnost a tedy i přesně danou závislost proud/napětí. Obvyklou hodnotou u ohebného provedení cívky je 300 nH, což při proudu 1000 A a frekvenci 50 Hz na výstupu cívky generuje napětí 94.2 mV. U aplikací vyznačujících se velice rychlými změnami proudu, např. pulzující výkon, se volí cívky s menší vzájemnou indukčností.

Nejlepší metodou pro zpracování napěťového výstupu cívky je napětí elektronicky integrovat. Integrovaný výstup je frekvenčně nezávislý a přesně reprezentuje průběh měřeného proudu. Použitím vhodných integrátorů lze použít ohebné cívky na měření proudů v rozsahu od méně než jednoho ampéru až do několika milionů ampér.

Konstrukce Rogowského cívky

Jedním z častých provedení Rogowského cívky je navinutý vodič na stočený prut z křemičité gumy. Zvláštní pozornost je věnována výrobě rovnoměrně stejných vinutí, které zajistí vysoký stupeň odolnosti proti rušení ze sousedních vodičů. Cívky mohou být potaženy elektrostatickou stínící sítkou a různými ochrannými povrchy podle požadavků. Použitý typ ochranného povrchu ovlivňuje stupeň ohebnosti cívky:

4. **Bez ochranného povrchu** - vhodné na izolované vodiče a cívku lze připevnit na místo lepicí páskou a potom obalit ochrannou elektrickou páskou. Je nejvíce ohebná.
5. **Plastické spletení** - poskytuje dobrou mechanickou ochranu beze ztráty ohebnosti, ale není vhodné pro použití ve znečištěném prostředí.
6. **Tepelně smrštitelné kryty** - sice méně ohebné než plastické spletení, ale poskytuje lepší ochranu proti nečistotám.
7. **Elektrostatická stínící síťka** - vhodná na měření velice malých proudů nebo tam, kde existuje možnost kapacitních vazeb s VF napětím. Zároveň redukuje síťové rušení. Její ohebnost je však nejmenší.



Obr. 14: Rogowského cívka (červená hadice s černým zámkem smyčky) s integrátorem a zesilovačem (černá krabička s kabelem) pro použití v elektroenergetice

Použitá literarura:

- [1] Ďaďo, S.; Kreidl, M.: Senzory a měřicí obvody. ČVUT Praha, 1996.
- [2] Ďaďo, S.; Sedláček M.: Měření aktivních elektrických veličin s neharmonickými průběhy. STTL Praha, 1987
- [3] Mišák, S.; Přístrojové transformátory. VŠB Ostrava, 2005
- [4] http://pandatron.cz/?914&dc/dc_nabojove_pumpy_a_jak_na_ne
- [5] http://umm.j2me.cz/index.php5?title=M%C4%9B%C5%99ic%C3%AD_transform%C3%A1tory_proudu_a_nap%C4%9Bt%C3%AD_funkce_vlastnosti_u%C5%BEit%C3%AD
- [6] <http://elektrika.cz/data/clanky/clanek.2006-04-01.2480110481>
- [7] <http://automatizace.hw.cz/co-je-k-cemu-je-jak-funguje-rogowskeho-civka>

3.8.
3.9.
3.10.
3.11.



Shrnutí pojmů