

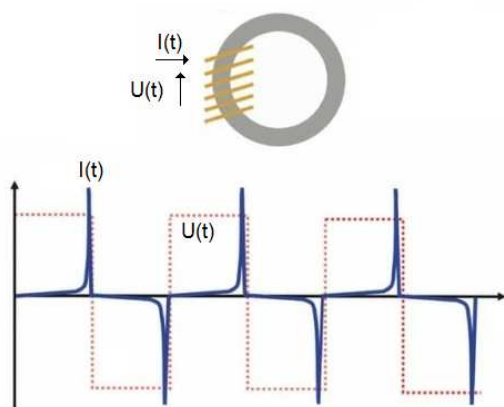
Jednoduchý DC ampérmetr ± 100 A na principu fluxgate

Ing. Josef Jansa, Josef Jansa DiS.

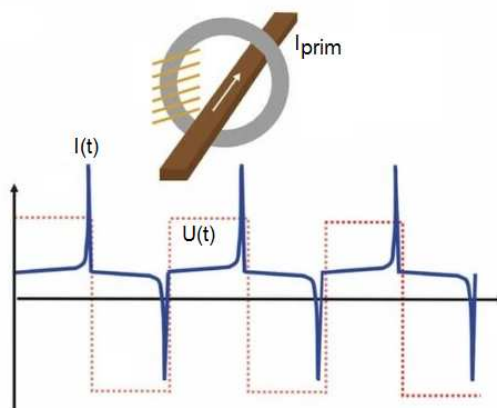
Bezpečné (bezkontaktní) měření velkých AC proudů je i v amatérských podmínkách celkem jednoduchá záležitost – běžně dostupný proudový transformátor [1] s přesným usměrňovačem a je v podstatě hotovo. S velkými DC proudy je to ale horší, protože jak si pamatujeme z fyziky, běžný transformátor stejnosměrný proud nepřenáší a zabudovat do něj Hallův snímač (princip klešťových ampérmetrů) není úplně triviální. Nebo že by to přece jen šlo i s jednoduchým trafem? Dále popsána konstrukce je výsledkem experimentů s principem snímačů fluxgate.

Princip fluxgate

Snímače fluxgate staví na dobře známém principu feromagnetických sond, používaných desítky let k měření velmi malých magnetických polí [2]. Z mnoha různých provedení (jednoduché, diferenciální, tyčové, toroidní.....) jsou realizačně asi nejsnazší sondy toroidní. Na obr. 1 jsou znázorněny časové průběhy proudu a napětí periodického signálu, přivedeného na budicí vinutí toroidního feromagnetického jádra. Velikost tohoto buzení je přitom taková, že je - jak prozrazují proudové špičky - jádro periodicky mírně přesycováno.



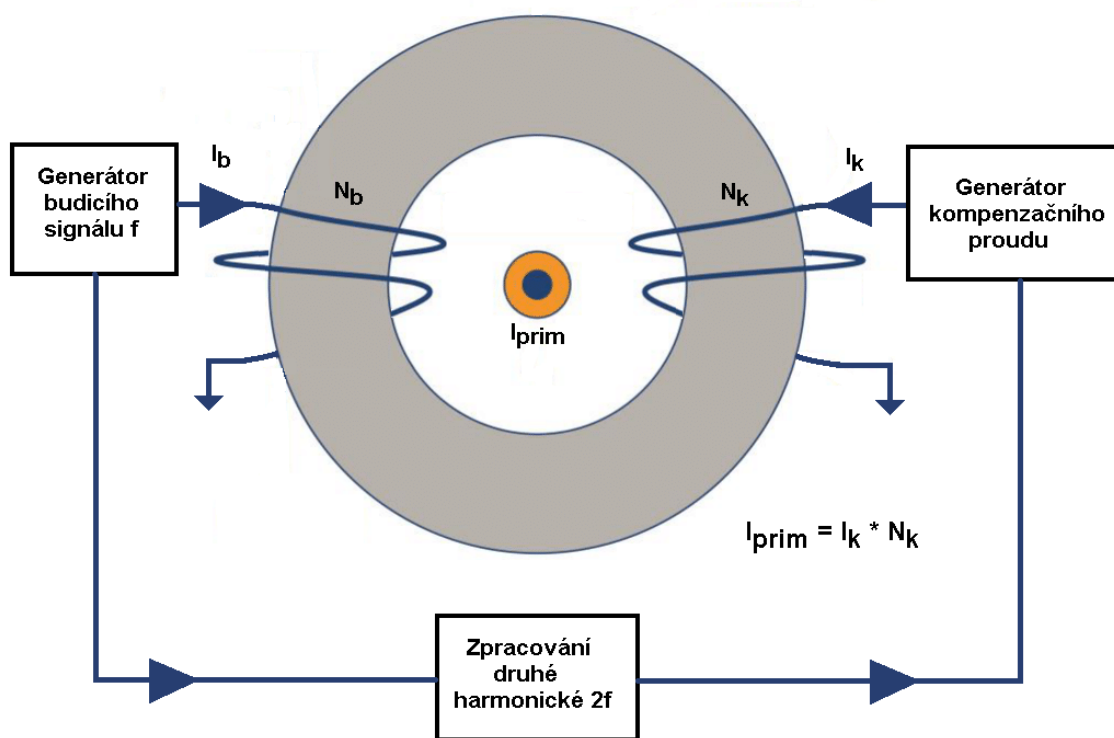
Obr. 1a



Obr. 1b

Není-li přítomno vnější magnetické pole (obr. 1a), jsou průběhy budicího napětí i proudu symetrické vůči ose Y a obsahují jen liché harmonické. Vnější magnetické pole, ať už např. zemské či generované průchodem měřeného (primárního) proudu otvorem jádra, způsobí posuv proudu i napětí ve směru osy Y (obr. 1b) a zároveň to, že se ve spektru budicího signálu objeví sudé harmonické.

Principem funkce diferenciální feromagnetické sondy, tj. nejjednodušší varianty fluxgate, je vyhodnocení velikosti druhé harmonické, úměrné velikosti vnějšího magnetického pole. Fluxgate ve své dokonalejší variantě k tomuto principu přidává ještě zpětnovazební funkci: malý proud v dalším (kompenzačním) vinutí s velkým počtem závitů generuje magnetické pole stejné velikosti, avšak opačné polarity, než má pole vnější. Tím dochází ke kompenzaci obou polí, přičemž velikost kompenzačního proudu je přímo úměrná proudu měřenému. Indikátorem vzájemného vynulování obou polí je přitom vymizení resp. minimalizace druhé harmonické budicího signálu – viz obr. 2.



Obr. 2

Je zřejmé, že konstrukce plnohodnotného snímače fluxgate není zrovna jednoduchá. Kromě generátoru budičícího signálu, jehož velikost a frekvence musí „ladit“ s materiálem feromagnetického jádra, jeho rozměry a počtem závitů budičícího vinutí, zde musí být i selektivní obvody druhé harmonické, její fázově citlivý usměrňovač a na něj navázané zpětnovazební obvody, generující kompenzační proud I_k . Kromě zmíněných dvou základních vinutí, tedy budičícího N_b a kompenzačního N_k , bývají profesionální fakturační snímače fluxgate konstruovány s hned několika toroidními jádry a dalšími pomocnými vinutími. Tyto složité sestavy pak umožňují měření i téměř libovolné kombinace AC a DC proudů, a to s vysokou přesností, teplotní nezávislostí a dlouhodobou stabilitou. To vše prakticky vylučuje možnost realizace takového snímače amatérskými prostředky.

Využití základu fluxgate

Při experimentech se snímači DC proudu na toroidním jádru bylo zjištěno, že pro amatérskou realizaci lze při akceptaci určitých nedostatků rezignovat na obvodově složitou zpětnovazební kompenzaci a využít jen samotného základu feromagnetické sondy resp. snímače fluxgate – periodické saturace feromagnetického jádra budičím signálem a posunu jeho pracovního rozsahu po B-H smyčce při přítomnosti vnějšího magnetického pole. Vyhodnocením nesymetrie napětí (obr. 1b), generovaného v pomocném (sekundárním) vinutí, lze pak snadno získat informaci o velikosti a orientaci primárního proudu, a to s překvapivě dobrou linearitou.

Nedostatky maximálně zjednodušené konstrukce fluxgate:

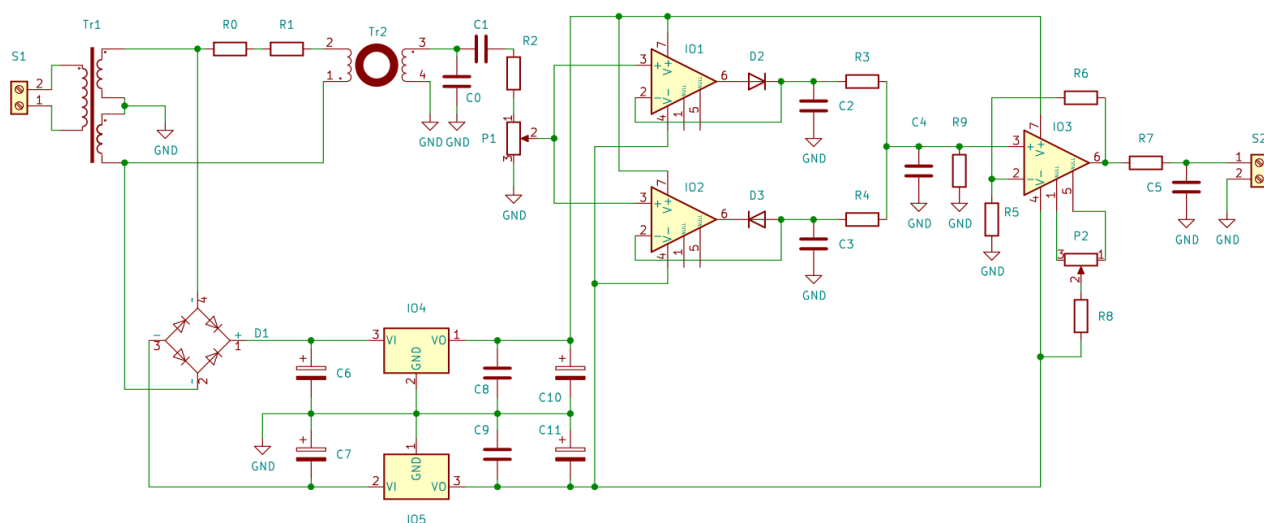
- Jako budič signál slouží sekundární napětí malého napájecího transformátoru, tedy kmitočet pouhých 50 Hz, oproti profesionálně používanému výkonovému generátoru frekvence desítek kHz. Daní za toto zásadní zjednodušení konstrukce je mírná závislost měřených hodnot na kolísání síťového napětí a jeho symetrii. Nízký budič kmitočet dále implikuje velké časové konstanty následných filtračních RC členů, což limituje možnost měření velmi rychle se měnících proudů.
- Na rozdíl od plnohodnotného snímače fluxgate, v němž je jádro buzeno do jen mírné saturace, musí být v tomto případě buzení tak velké, aby se jádro do saturace dostávalo i při maximální velikosti měřeného DC proudu, a to včetně rezervy na přípustné minimum síťového napětí. Proudové špičky, které jsou toho důsledkem, se ovšem v ohmickém odporu budičícího vinutí mění na teplo a jsou příčinou ohřevu celého snímače. Zvyšování úrovně buzení nad uvedenou mez tudíž není účelné, neboť jen zvyšuje spotřebu energie celé konstrukce. I při optimální volbě úrovně budičícího signálu však k mírnému oteplení snímače dochází, což ovlivňuje přesnost měření. Při zvýšených požadavcích na přesnost, např. při cejchování, je proto vhodné nechat ampérmetr po zapnutí nějaký čas zahřát. Je zřejmé, že je volba sekundárního napětí

síťového transformátoru a počtu závitů budicího vinutí docela složitá a v konstrukci použité typy není bez hlubší znalosti věci radno měnit.

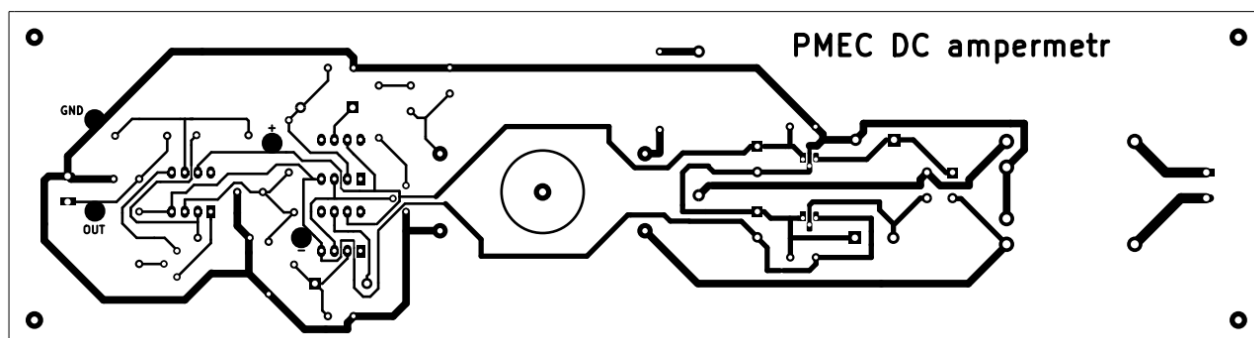
- Díky vysokému zesílení zpětnovazební smyčky je u plnohodnotného snímače fluxgate magnetování jádra i za přítomnosti měřeného proudu vždy symetrické, což zaručuje perfektní linearitu a teplotní nezávislost měření. Předložená konstrukce kompenzační princip nepoužívá, takže se vyhýbá fázově řízenému usměrňovači, selektivnímu zesilovači, generátoru kompenzačního proudu apod. a sekundární vinutí slouží pouze k vyhodnocení tvaru budicího signálu. Daní za rezignaci na kompenzační princip a za nesymetrickou magnetizaci jádra je určitá teplotní závislost měření a (alespoň teoreticky) horší linearita – ta je však přesto velmi dobrá.

Zapojení

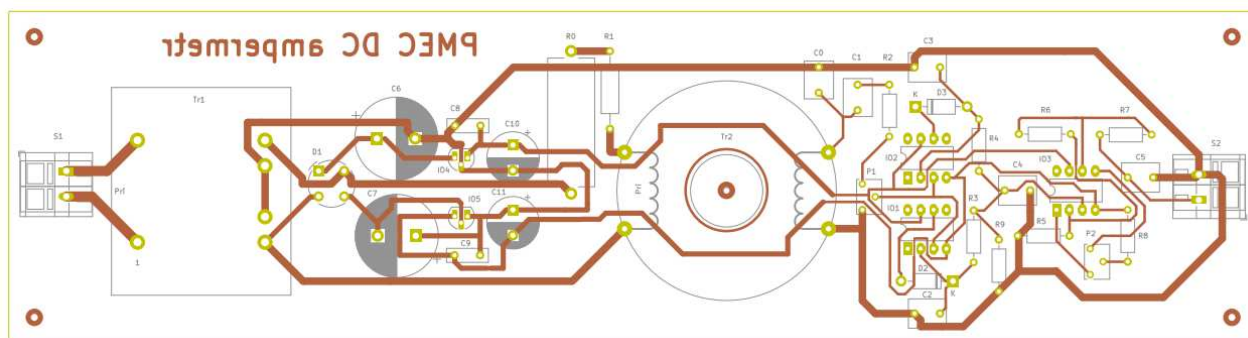
Schéma ampérmetru a konstrukce realizovaná na jednostranné DPS jsou na obr. 3 až 6.



Obr. 3



Obr. 4

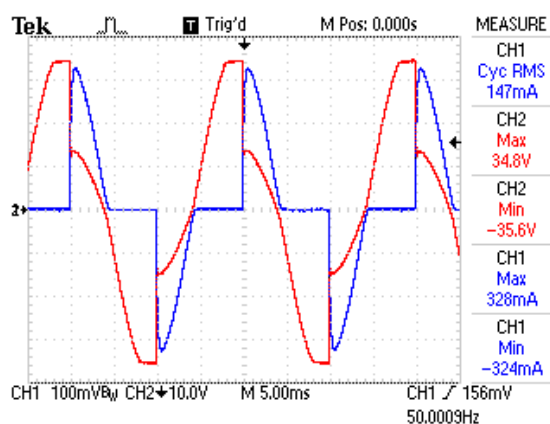


Obr. 5

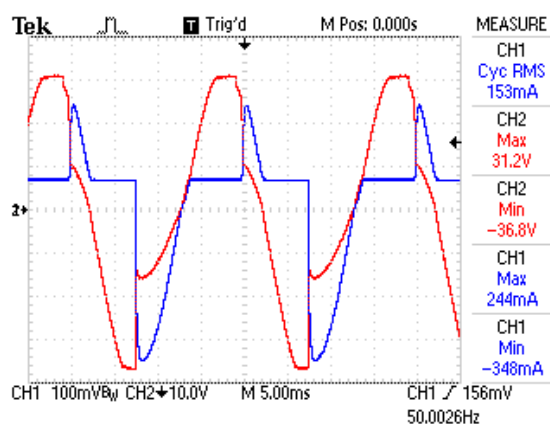


Obr. 6

Ampérmetr je postaven kolem proudového snímače Tr2 s 1500 závitů (budící vinutí) a 500 závitů (snímací vinutí). Snímač je opatřen vyvrtaným středovým otvorem o průměru 13 mm, jímž se provléká vodič protékající měřeným DC proudem. (O něco větší otvor je třeba samozřejmě vyvrtat i v DPS.) Optimální velikost špiček budícího proudu, odebíraného ze sekundáru napájecího transformátoru Tr1, „dolaďuje“ předřadný rezistor R0, který je pro usnadnění měření proudu osciloskopem doplněn rezistorem R1 s hodnotou 1 Ω . Průběhy proudu a napětí budícího signálu jsou uvedeny na obr. 7, a to pro nulový měřený proud (obr. 7a) resp. proud 100 A (obr. 7b). Červeně je vykresleno budící napětí, modře pak budící proud.



Obr. 7a



Obr. 7b

Zatímco při nulovém měřeném proudu jsou oba průběhy téměř ideálně symetrické, při proudu 100 A je ve shodě s teorií (obr. 1) patrná výrazná nesymetrie. Poměr kladného a záporného maxima přitom činí 1,179 v případě napětí resp. 1,426 v případě proudu. Na první pohled by tedy bylo logičtější vyhodnocovat nesymetrii proudovou, z důvodu snadné obvodové realizovatelnosti však byla dána přednost nesymetrii napěťové. Ta je

vyhodnocována špičkovými usměrňovači s IO1 a IO2, jejichž výstupy se sčítají (vzhledem k opačným polaritám napětí tedy vlastně odečítají) s následným zesílením výsledku v IO3. Na jeho výstupu je pak napětí ± 10 V, úměrné měřenému proudu ± 100 A. Nastavení převodního poměru ampérmetru 10 A/V se provádí trimrem P1, nastavení nulového výstupního napětí při nulovém měřeném proudu pak trimrem P2. Obě nastavení se mírně ovlivňují a je proto nutné je několikrát opakovat. Důležité je také vyčkat na ustálení teploty zejména snímače Tr2, ohřívají se ovšem i Tr1 a R0.

Samozřejmě nelze předpokládat, že k cejchování bývá běžně k dispozici zdroj DC proudu 100 A. K nastavení převodního poměru naštěstí postačí i proud menší, který na vyšší hodnoty „vynásobíme“ větším počtem primárních závitů. Velmi dobře se osvědčil zdroj proudu 10 A a 10 primárních závitů, zatímco varianta 5 A a 20 závitů již vedla k občasné nestabilitě proudu snímačem Tr2 a tím i k „neklidu“ výstupního napětí. (Možným vysvětlením je již příliš vysoká indukčnost primárního vinutí, jejíž energie při skokovém přechodu jádra do saturace ovlivňuje jeho magnetické pole.)

Stručně k některým součástkám

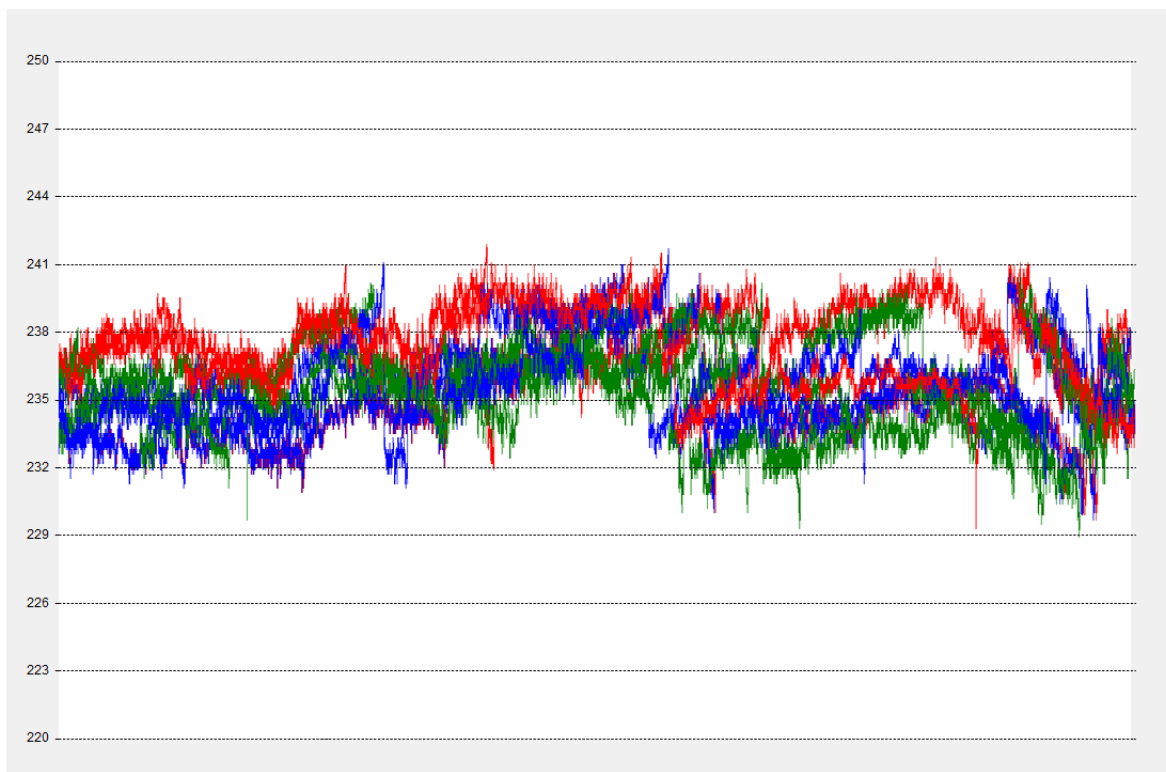
Kondenzátor C0 filtruje špičky, které vznikají při skokovém přechodu jádra do/ze saturace. Kondenzátory C2 až C5 spolu s příslušnými rezistory filtrují zbytky nízkého budicího kmitočtu 50 Hz, proto mají maximální kapacity dostupné ve svítkovém provedení. Trimry P1 a P2 jsou kvalitní víceotáčkové, takže jak nulu, tak i převodní poměr lze nastavit velmi přesně. IO1 a IO2 by bylo možno nahradit dvojitým OZ v jednom pouzdře, pro tuto variantu se však nepodařilo navrhnout jednostrannou DPS bez propojek. Rezistor R7 má jen ochrannou funkci, avšak může být podle potřeby přizpůsoben připojenému zobrazovači (viz níže).

Dosažené parametry

Citlivost na velikost a čistotu síťového napětí

Intenzita magnetického pole, kterou ve snímači Tr2 generuje budicí proud, podstatně převyšuje velikost nutnou pro úplné nasycení jádra. Tím je zaručeno, že až do DC proudu ± 100 A zůstane feromagnetikum oboustranně saturováno i při poklesu síťového napětí na minimální povolenou hodnotu 207 V (230 V - 10 %). Daní za nestabilizované buzení je však mírná závislost měření na velikosti tohoto napětí – konkrétně při poklesu napětí sítě o 10 % se výstupní napětí ampérmetru zvýší o 3,3 %. Opačný extrém, tedy měření při 253 V, nemohl být realizován.

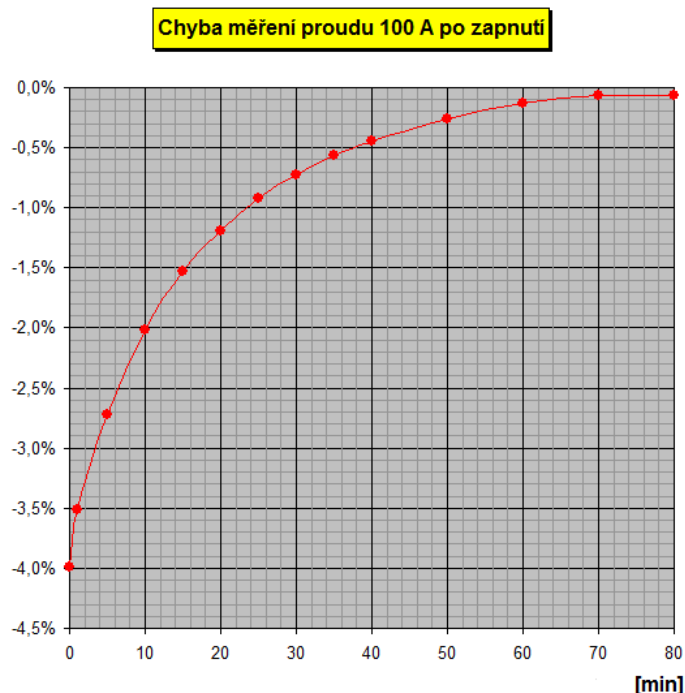
Ve skutečnosti však zřejmě kolísá napětí sítě méně - v místě bydliště autorů byl např. zjištěn interval 229 V až 242 V (viz obr. 8 a opakované 24 hodinové měření všech tří fází). Z titulu nestálosti síťového napětí se tedy v tomto konkrétním případě může výstupní napětí ampérmetru pohybovat v intervalu o šířce asi 2 %.



Obr. 8

Ustálení hodnot po zapnutí

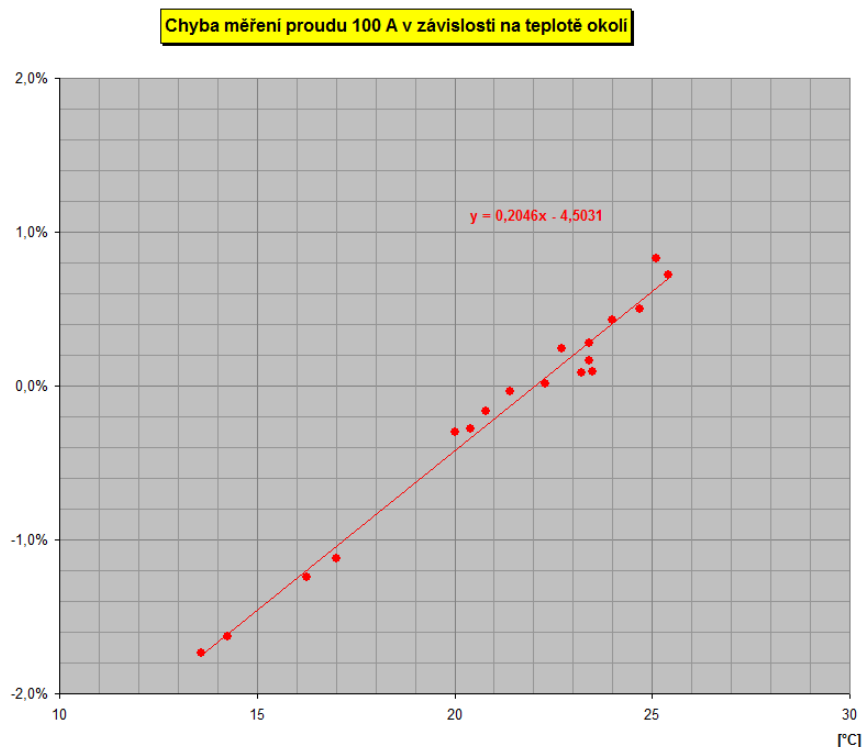
Jak bylo řečeno, je daní za periodické přesycování jádra ohřev snímače Tr2 ztrátami v mědi. Pro co nejlepší výsledky měření je proto vhodné nechat teplotu snímače dostatečně ustálit po dobu alespoň jedné hodiny (lépe 2 hodin), jak vyplývá z obr. 9 a měření proudu 100 A.



Obr. 9

Citlivost na okolní teplotu

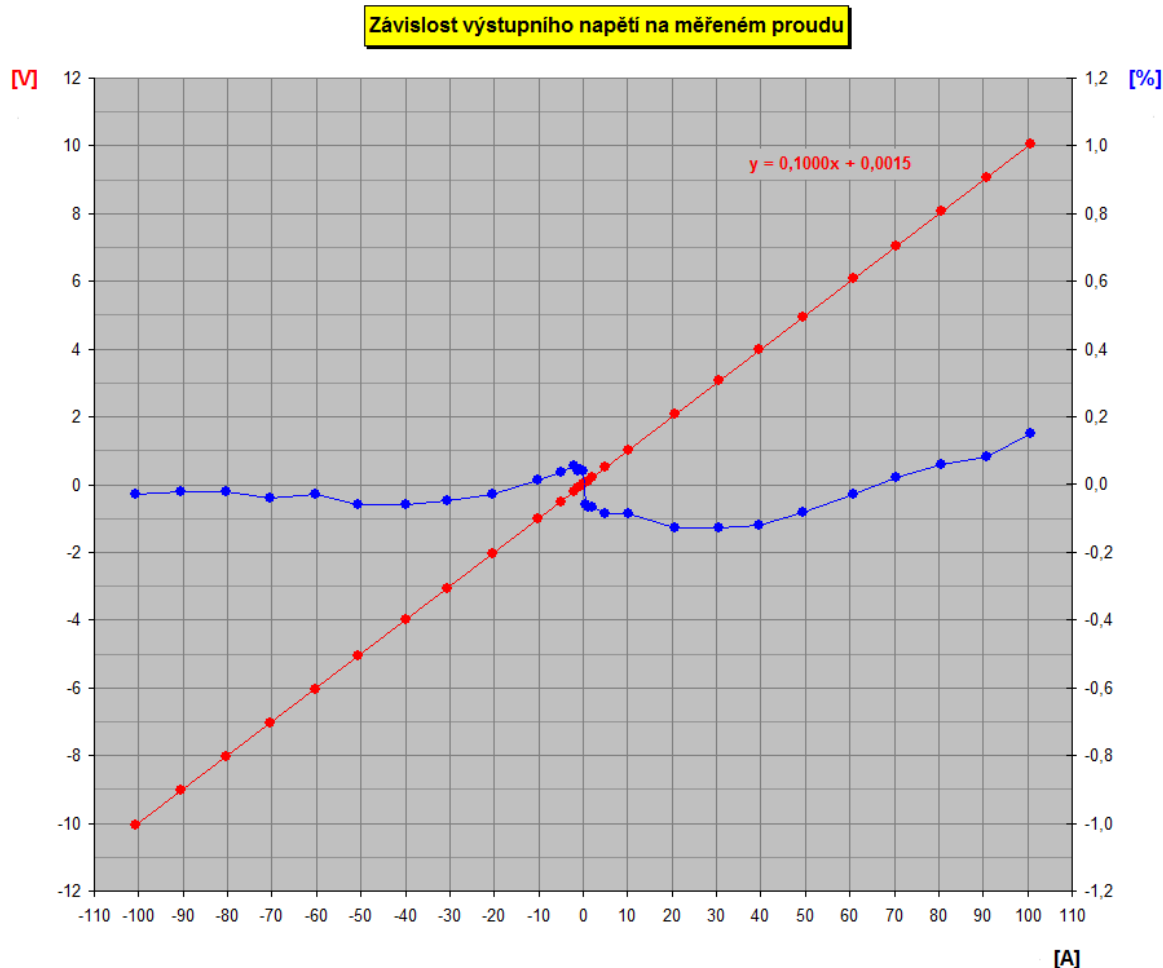
Vliv na ohřev snímače Tr2 a tedy i na velikost výstupního napětí má samozřejmě i okolní teplota. Obr. 10 ukazuje chyby měření proudu 100 A, získané během delšího časového období při různých teplotách laboratoře, přičemž jako referenční byla zvolena teplota 22 °C. Regresní přímka prozrazuje teplotní závislost asi + 0,2 %/°C, takže při uvažovaném rozptylu teploty v místě instalace ampérmetru ± 5 °C se jeho výstupní napětí bude z tohoto titulu pohybovat v intervalu o šířce asi 2 %.



Obr. 10

Linearita

Pro vyloučení všech výše uvedených negativních vlivů byla linearita zjišťována při napájení z čistého a stabilního zdroje napětí 230 V, a to po dostatečném ustálení teploty ampérmetru a okolní teplotě 22 °C. Červená barva na obr. 11 znázorňuje naměřené hodnoty proložené regresní přímkou a její rovnici, zatímco modrou barvou je vynesena relativní chyba měření vztažená k plnému rozsahu 100 A. Je zřejmé, že se za ideálních podmínek linearita pohybuje v řádu desetin procenta, přičemž chybová křivka zahrnuje též případné chyby použitých měřicích přístrojů, tedy DC voltmetru Keithley a DC ampérmetru GW Instek.



Obr. 11

Energetická spotřeba

Podle výpočtu osciloskopu Tektronix (obr. 7) je efektivní hodnota budicího proudu asi 150 mA, takže ohmické ztráty v budicím vinutí snímače Tr2 činí cca 1 W. V předřadných rezistorech R0+R1 se na teplo mění necelých 0,8 W, ztráty v železe transformátoru Tr1 činí podle údajů výrobce typicky 1,5 W. Protože celý ampérmetr odebírá ze sítě činný příkon cca 4,3 W, připadá na ztráty ve vinutích Tr1 a na vcelku zanedbatelnou spotřebu elektroniky zbývající asi 1 W. Těmto údajům odpovídá i ohřev jmenovaných součástí – výrazněji se hřeje jen R0 s malou ochlazovací plochou, mírně pak i Tr1 a Tr2.

Závěr

Krátkodobá kolísání síťového napětí (obr. 8) spolu s všudypřítomným rušením blízkými průmyslovými i domácími spotřebiči způsobují nestabilitu výstupního napětí ampérmetru v řádu desetin procenta (tedy např. stovek mA při proudu 100 A) a v případě číslcového zobrazení tedy i „problikávání“ posledních míst displeje. Ideálním zobrazovačem výstupního napětí popsaného ampérmetru by proto byl analogový přístroj s nulou uprostřed, který je však dnes již prakticky nesehnatelný. Pokud postačuje měření DC proudu jediné polaridy, je nejvhodnějším řešením panelový ručkový ampérmetr s rozsahem 100 μ A, např. dobře dostupný typ 69C9, a odpor R7 zvýšený na 100 k Ω - v opačném případě je nutno pomoci si další elektronikou (viz níže).

Maximálně zjednodušená konstrukce DC ampérmetru na principu fluxgate samozřejmě nedosahuje parametrů požadovaných pro fakturační přístroje. Při umístění ve vnitřním prostředí s přiměřeně stálou teplotou a akceptací možné chyby měření několika málo procent je však velmi dobře použitelná např. pro měření proudu z fotovoltaiky či proudu tekoucího do/ze zálohovací baterie OZE.

Rozpiska ampérmetru

Součástka	Hodnota	Typ GM electronic
C0	1u 63V svitkový	FARATRONIC CF
C1	1u 63V svitkový	FARATRONIC CF
C2	1u 63V svitkový	FARATRONIC CF
C3	1u 63V svitkový	FARATRONIC CF
C4	1u 63V svitkový	FARATRONIC CF
C5	1u 63V svitkový	FARATRONIC CF
C6	1000u 63V elektrolyt	HITANO CE
C7	1000u 63V elektrolyt	HITANO CE
C8	100n/63V keramický	CK
C9	100n/63V keramický	CK
C10	1000u/25V elektrolyt	HITANO CE
C11	1000u/25V elektrolyt	HITANO CE
D1	B250R	
D2	1N4007	
D3	1N4007	
IO1	TL071 DIP8	
IO2	TL071 DIP8	
IO3	TL071 DIP8	
IO4	78L12 TO-92	
IO5	79L12 TO-92	
P1	10K víceotáčkový	VISHAY 64 Y
P2	100K víceotáčkový	VISHAY 64 Y
R0	33R/5W	
R1	1R0/1W	
R2	1K2	
R3	1M0	
R4	1M0	
R5	10K	
R6	120K	
R7	100R popř. 100K (viz text)	
R8	1K5	
R9	1M0	
S1	svorkovnice dvojpólová 5 mm	KLS 301
S2	svorkovnice dvojpólová 5 mm	KLS 301
Tr1	síťové trafo Hahn 2x9V 4,5VA	BV EI 382 1190
Tr2	toroidní trafo P MEC PPT6/H 1500:500	

Literatura

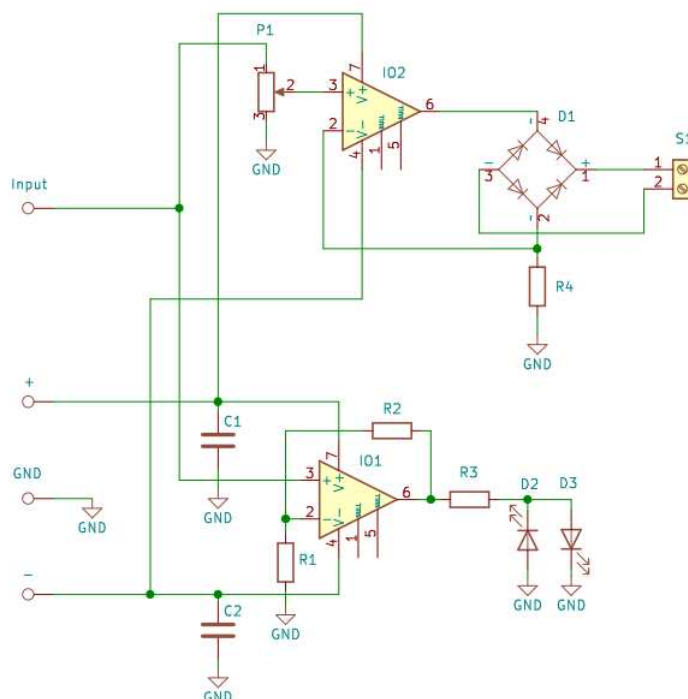
- [1] www.pmec.cz, Download, Literatura [6], [19], [20], [21]
- [2] Měřicí zařízení pro stanovení koercitivní síly
Diplomový úkol, J. Jansa, VUT FE Brno, 1978

Analogový indikátor k DC ampérmetru

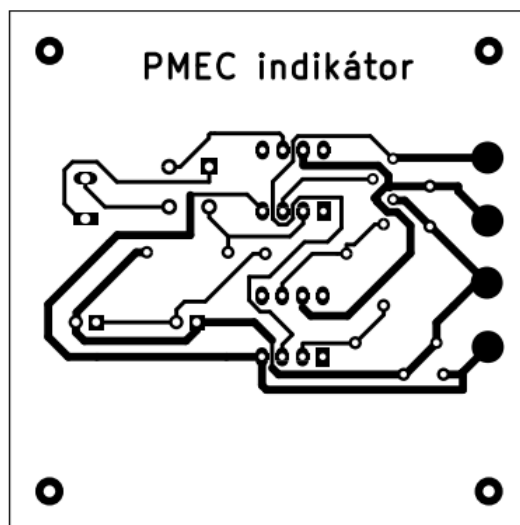
Tento jednoduchý indikátor byl k výše popsanému DC ampérmetru vyvinut následně jako alternativa k dnes již nedostupným panelovým přístrojům s nulou uprostřed. DPS ampérmetru (obr. 4) byla proto dodatečně rozšířena o čtyři plošky přípojných míst.

Zapojení

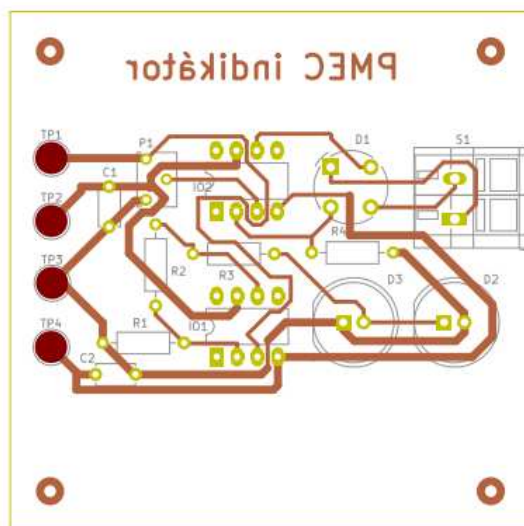
Schéma indikátoru a jeho jednostranné DPS jsou na obr. 12 až 14. Rozměrově je konstrukce přizpůsobena desce DC ampérmetru, lze ji však použít i jako samostatný přístroj pro analogové měření stejnosměrného napětí obou polarit.



Obr. 12



Obr. 13



Obr. 14

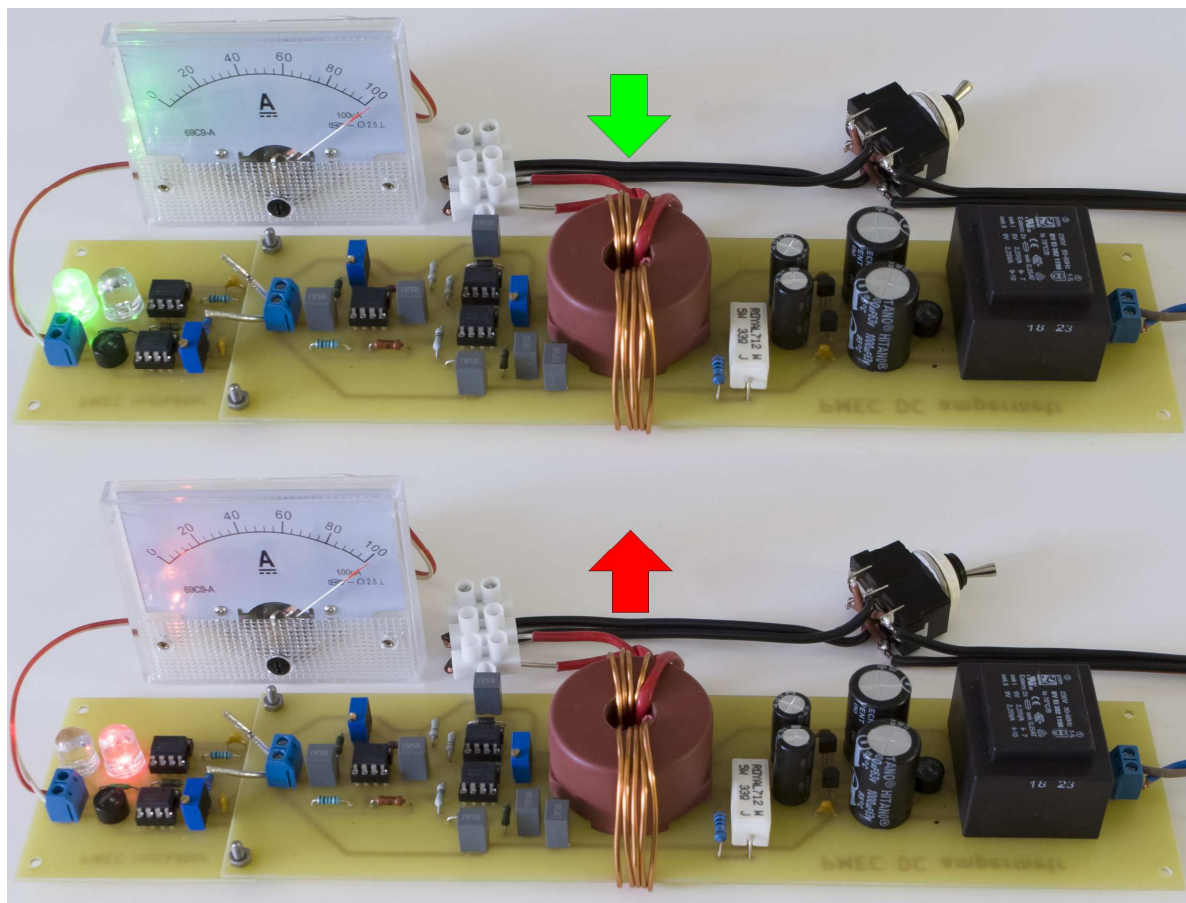
Základem indikátoru je přístrojový usměrňovač s IO2, k jehož výstupním svorkám S1 je připojen panelový analogový mikroampérmetr s rozsahem $100 \mu\text{A}$ (ideálně s odstraněným znakem μ). Na jeho vnitřním odporu nezáleží, při předpokládaném napájení $\pm 12 \text{ V}$ z DC ampérmetru by však neměl překročit cca $10 \text{ k}\Omega$. V prototypu byl použit několika prodejci nabízený přístroj 69C9 s naměřeným vnitřním odporem 1460Ω . Víceotáčkovým trimrem P1 se nastavuje plná výchylka přístroje při vstupním napětí $\pm 10 \text{ V}$.

K optickému rozlišení polarity výstupního napětí DC ampérmetru slouží komparátor s IO1 - podle směru toku měřeného proudu se rozsvítí LED buď zelená (např. nabíjecí proud baterie FVE) nebo červená (např. proud z baterie FVE). Velikost proudu LED je určena odporem R3, přičemž pro dostatečný svit supersvítivých LED postačuje 1 mA , u běžných LED je lépe volit 5 mA . V prototypu byly osazeny dvě supersvítivé LED průměru 10 mm , použít lze samozřejmě i jedinou dvoubarevnou LED v antiparalelním zapojení. Zesílení komparátoru a tedy i proud, který již bude svitem jedné z LED indikován, je určen poměrem odporů R2 a R1. Při příliš velkém zesílení (např. při neosazení R2) sice LED reagují již na velmi malé proudy, zároveň však v důsledku drobných fluktuací sítě problikávají i při proudu nulovém. Zvolené zesílení $34\times$ je proto kompromisem – v bezproudovém stavu LED neproblikávají, svítit začínají při několika stovkách mA a naplno svítí při proudu menším než 2 A , tedy proudu, na který ručka analogového přístroje teprve začíná viditelně reagovat. V případě příliš „neklidné“ sítě je možno odpor R2 dále snížit.

Desku indikátoru lze dvěma šrouby M3 spojit s deskou DC ampérmetru, přičemž elektrické spojení zajistí čtyři propojky izolovaným vodičem ze strany spojů. Vzhled celku při měření proudu 100 A obou polarit přináší obr. 15, na němž je Tr 2 opatřen primárním vinutím 10 závitů a doplněn přepínačem směru proudu ze zdroje 10 A – barevné šipky naznačují tok výsledných 100 A .

Významnou výhodou analogového panelového přístroje se ukázala být setrvačnost jeho ústrojí, která dokonale filtruje případné na výstup pronikající zbytky nečistot sítě – ručka přístroje se při měření konstantního proudu „ani nehne“. Dlouhodobý provoz při umístění ampérmetru v interních prostorách s relativně konstantní teplotou ukázal, že jediným pozorovatelným jevem negativně ovlivňujícím měření je náběh hodnot po zapnutí (obr. 9).

Vzhledem k tomu, že u analogového přístroje „neřešíme“ na rozdíl od digitálního zobrazení třetí či čtvrtá platná místa výsledku, nabízí se možnost nahradit na obou deskách relativně drahé víceotáčkové trimry pro nastavení nuly a plné výchylky levnějšími jednoduchými cermetovými trimry (nebylo odzkoušeno). Na desce ampérmetru není při spojení s popsáním indikátorem samozřejmě nutno osazovat svorkovnici S2.



Obr. 15

Rozpiska indikátoru

Součástka	Hodnota	Typ GM electronic
C1	100n/63V keramický	CK
C2	100n/63V keramický	CK
D1	B250R	
D2	LED zelená	
D3	LED červená	
IO1	TL071 DIP8	
IO2	TL071 DIP8	
P1	100K víceotáčkový	VISHAY 64 Y
R1	100R	
R2	3k3	
R3	10K popř. 2K2 (viz text)	
R4	82K	
S1	svorkovnice dvojpólová 5 mm	KLS 301