

Měřicí proudový transformátor PPT4/H 1000

Ing. Josef Jansa

Proudové transformátory se obvykle používají k přizpůsobení rozsahu měřicího přístroje - nejčastěji ampérmetru - velikosti měřeného proudu a zároveň též ke galvanickému oddělení obou obvodů. V závislosti na požadovaných parametrech převodu, jako jsou přesnost, linearita, fázová chyba, teplotní nezávislost, pracovní kmitočet apod. se proudové transformátory realizují na uzavřených nebo alespoň uzavíratelných dělených jádrech z vhodných feromagnetik. Proudové kleště, známé ze servisních ampérmetrů či nabízené jako doplněk lepších číslicových multimetrů, vystačí se skládanými jádry z kvalitních transformátorových plechů. Pro nejkvalitnější měřicí proudové transformátory se však zpravidla používají toroidní jádra svinutá z tenkého páskového permalloye, která mohou kmitočtově vyhovět až do několika stovek Hz. Protože jsou tato jádra i technologie jejich ovíjení poměrně nákladné, používají se přesné transformátory v amatérské praxi jen zřídka. Tento příspěvek se zabývá vlastnostmi a příkladem použití přesného proudového transformátoru domácí produkce, který svými parametry vyhoví většině profesionálních požadavků a přesto zůstává cenově dostupný i pro domácí měřicí dílnu.

Proudový transformátor PPT4/H 1000 firmy P MEC Šumperk je realizován v horizontálním pouzdře pro montáž do DPS, jehož vzhled, rozměry a zapojení vývodů jsou na obr. 1. Použité permalloyové toroidní jádro je ovinuto 1000 závyty tenkého vodiče, který tvoří pevné (zabudované) sekundární vinutí. Pouzdro je opatřeno středovým otvorem průměru 7 mm, kterým se provléká primární vinutí. Jeden průchod vodiče tímto otvorem znamená vytvoření proudového transformátoru s převodním poměrem 1 : 1000, dva průchody vytvoří poměr 2 : 1000 atd. Použité materiály zaručují nehořlavost a samozhášivost transformátoru, izolační bezpečnost 2500 V a dokonalé galvanické oddělení primárního obvodu od připojeného měřicího zařízení. Určitou nevýhodou horizontální zástavby je nutnost provrtat do DPS otvor pro průchod primárního vodiče.

Vzorek transformátoru byl na profesionálním pracovišti testován v základním zapojení 1 : 1000, při síťovém kmitočtu a při různých hodnotách zatěžovacího odporu, přičemž bylo zjištěno :

- Optimální zatěžovací odpor transformátoru je s ohledem na co nejlineárnější a nejméně zvlněnou převodní charakteristiku 50Ω , přičemž mírná odchylka od této hodnoty není na závadu.
- Převodní poměr transformátoru mírně závisí na zatěžovacím odporu, od jmenovité hodnoty 1 : 1000 se však neodchyluje o více než $\pm 1 \%$.
- Při zatěžovacím odporu 50Ω nelze v rozsahu proudů 200 mA až 20 A zjistit odchylku od linearity a ještě v rozsahu 100 mA až 30 A je linearita lepší než $\pm 0,2 \%$.
- Zřetelné přesycení jádra, omezující použitelnost transformátoru shora, nastává při zatěžovacím odporu 50Ω až při proudech nad 60 A.

- Výrazná odchylka zatěžovacího odporu od optima může pásmo linearity mírně posunout požadovaným směrem - při 100 Ω směrem k nižším hodnotám (přesycení kolem 45 A), při 20 Ω směrem k vyšším hodnotám (přesycení kolem 70 A). Zároveň však dochází k celkovému zhoršení linearity a zvlnění přenosové přímky v řádu desetin %.

Výsledky měření linearity přenosu proudového transformátoru při zatěžovacím odporu 50 Ω jsou graficky zachyceny na obr. 2 (plná čára).

Velmi dobré parametry samotného transformátoru vyžadují též přiměřeně kvalitní následné zpracování jeho signálu. Pro amatérskou praxi nejjednodušší je zatížit transformátor přesným odporem 100 Ω / 0,5 W (výsledný převodní poměr bude 10 A / 1 V) a připojit k němu běžný číslicový multimetr se střídavými rozsahy 200 mV, 2 V a 20 V. Bez pracného přepočítávání, pouze s "nesedící" desetinnou čárkou, tak dostaneme velmi levný a přitom relativně kvalitní galvanicky oddělený číslicový ampérmetr s rozsahem asi 20 mA až 40 A. (Lze rovněž použít vestavných měřicích modulů, které nezávislé přepínání desetinné čárky umožňují).

Chceme-li transformátor použít jako součást rozsáhlejšího zařízení, bude nejspíš třeba jeho signál nějak upravit. Účelným se jeví použití přesného usměrňovače a následná unifikace stejnosměrného měřonového signálu na standardní úroveň, vhodnou např. pro převod A/D. Nemá-li však usměrňovač a další připojené obvody parametry transformátoru degradovat, je nutno volit co nejlepší obvodové řešení a kvalitní součástky.

Jako velmi jednoduchý a přitom dostatečně kvalitní modelový příklad byl vyvinut převodník 30 A_{ef} / 12 V_{ss}, jehož zapojení je na obr. 3, plošný spoj na obr. 4 a osazovací plán na obr. 5. Zapojení sestává z přesného přístrojového usměrňovače IO₁ a IO₂, pasivního dvojitého dolnofrekvenčního RC filtru a oddělovacího zesilovače IO₃. Součástí DPS je i jednoduchý stabilizovaný napájecí zdroj, kompletující převodník na zcela samostatnou funkční jednotku. Část DPS se zdrojem je možno v naznačeném místě od vlastního převodníku oddělit a pro napájení použít již existující rozvod ± 15 V.

Výběr součástek :

Jako měřicí OZ jsou použity vynikající a přitom cenově velmi dostupné přesné operační zesilovače OP07CP. Pokusu nahradit je běžnými OZ řady MAA741, TL061 a podobnými typy je lépe se vyvarovat - parametry zapojení se zhorší nejméně o řád, čímž se podstatně znehodnotí vlastnosti samotného měřicího transformátoru. Hodnoty rezistorů jsou zvoleny tak, aby bylo dosaženo co největšího měřicího rozsahu - jejich změna může tudíž vést k omezení tohoto rozsahu limitací signálu v některém z OZ. S výjimkou R₉, R₁₀ a R₁₃ je vhodné volit jejich toleranci alespoň 1 %, zvláště důležitá je i vzájemná shoda hodnot R₅ až R₈, která by měla být co nejlepší. Tolerance a typ kapacit naproti tomu důležité nejsou, pouze kondenzátory C₁ a C₂ by měly být kvalitní plastové typy (styroflex apod.). Při dodržení těchto podmínek bude po přesném nastavení celkového převodního poměru jednotky velikostí R₂ a R₃ (viz dále) celková velikost zatěžovacího odporu transformátoru, daná paralelní kombinací R₁//R₂//R₃//R₄, velmi blízká optimální hodnotě 50 Ω .

Nastavení převodníku :

Zapojení je natolik průhledné, že by se základním uvedením do provozu neměly být žádné těžkosti. K cejchování převodníku na přesný poměr $30 A_{ef} / 12 V_{ss}$ není naštěstí potřeba střídavý zdroj proudu desítek ampér, neboť lze s výhodou využít možnosti několikanásobného průchodu primárního vodiče otvorem transformátoru. Potřebovat naproti tomu budeme střídavý číslicový ampérmetr a stejnosměrný číslicový voltmetr - čím lepší přesnost obou přístrojů, tím lépe. Z jakéhokoliv síťového transformátoru přivedeme přes vhodný rezistor a číslicový ampérmetr proud do primárního vinutí, jehož počet závitů zvolíme tak, aby se celkový počet primárních ampérvávitů blížil zdola hodnotě 30 A. Velikostí odporu paralelní kombinace rezistorů $R_2//R_3$, které osazujeme během nastavování, potom nastavíme výstupní napětí převodníku na svorce S_1 na hodnotu odpovídající převodnímu poměru. Pro účely nastavení je ideální odporová dekáda, postačí však i odporový trimr hodnoty 1K2.

Praktický příklad : síťový transformátor 9 V / 10 W zatížíme odporem 10Ω (pozor na jeho příkon) tak, aby jím protékal proud přibližně 1 A. Předběžně změřenou hodnotou, řekněme 0.92 A, vydělíme číslo 30 a desetinná místa výsledku „odřízneme“. Tak dostaneme počet závitů, kterými ovineme otvor transformátoru – v našem případě 32 závitů vodičem asi 0.3 mm. (Pozor, počítají se průchody otvorem!). Poté toto vinutí vřadíme do obvodu síťového transformátoru a znovu, tentokrát přesně, změříme proud, který se samozřejmě mírně změní. Řekněme, že naměříme 0.915 A, takže odporovým trimrem zapojeným paralelně k R_1 nastavíme výstupní stejnosměrné napětí na hodnotu $0.915 * 32 / 30 * 12 = 11.71$ V. Celé nastavení několikrát zopakujeme, protože údaje obou měřících přístrojů kolísají jak vlastním driftem, tak i nestabilitou sítě (nejlépe se cejchuje v noci, kdy je krátkodobá stabilita síťového napětí nejlepší). Nakonec nastavený odpor trimru změříme a nahradíme pevnou hodnotou - pro vytvoření "nekulaté" hodnoty máme k dispozici paralelní kombinací $R_2//R_3$. Na závěr provedeme kontrolní výpočet celkové hodnoty zatěžovacího odporu transformátoru (paralelní kombinace $R_1//R_2//R_3//R_4$), která by se od optimálních 50Ω měla lišit jen o jednotky procent.

Prototyp převodníku byl proměřen s využitím zmíněného "triku" vícenásobného průchodu primárního vodiče otvorem transformátoru a dostupné měřicí techniky (střídavý ampérmetr Metex a stejnosměrný voltmetr HP). Zjištěný ofset, tj. zbytkové výstupní stejnosměrné napětí bez vstupního signálu, byl 0.6 mV. Tato hodnota je sice příznivě malá (při osazení TL061CN byl ofset 40 mV), přesto však významně ovlivňuje linearitu převodníku v oblasti malých měřených proudů. To je zřejmé z grafu na obr 2, kde je tečkovanou čarou vynesena linearita převodníku včetně ofsetu a čárkovanou čarou linearita s jeho korekcí, tj. s odečtením 0.6 mV od hodnot výstupního napětí. Přestože u daného konkrétního vzorku provedená korekce rozsah lineární oblasti paradoxně zmenšila, neboť kladná hodnota ofsetu působí proti nelinearitě usměrňovače v oblasti malých vstupních napětí, je uvedení korigovaného průběhu poctivější - ofset může být totiž u každého realizovaného převodníku poněkud jiný.

Z korigovaného průběhu linearity je zřejmé, že je převodník velmi dobře použitelný v oblasti proudů 1 až 30 A, v níž nijak nedegraduje vlastnosti samotného transformátoru PT4/H 1000. Nad 30 A dochází ke strmému růstu nelinearity v důsledku přiblížení se výstupního napětí IO_3 napětí

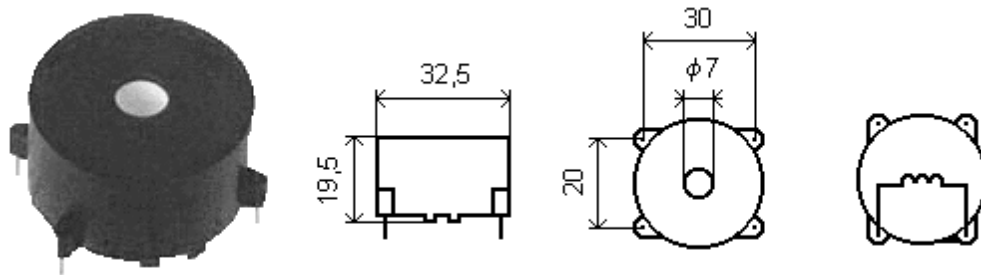
napájecímu. (Mírného posunu horní hranice měřeného proudu k hodnotě asi 35 A by bylo zřejmě možno dosáhnout zvětšením napájecího napětí z ± 15 V na ještě přijatelných ± 18 V). Nelinearitu ± 0.2 %, kterou můžeme pokládat za jakousi míru kvality, překračuje převodník při proudech pod 0.6 A.

Změnou počtu průchodů primárního vinutí otvorem transformátoru lze proudový rozsah převodníku přizpůsobit potřebě - např. při deseti primárních závitech se oblast použití změní na 60 mA až 3 A.

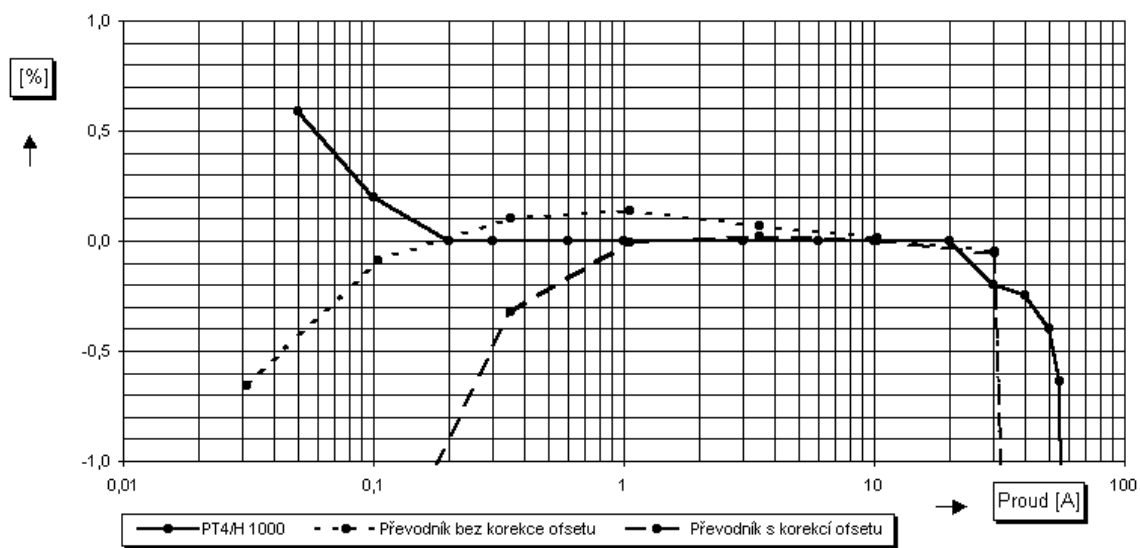
Bude-li výstup převodníku připojen k mikropočítači, lze se pokusit softwarovou korekcí rozšířit měřicí rozsah směrem k nižším hodnotám proudu podobně, jak to u měřeného vzorku "způsobil" jeho ofset. U realizovaného vzorku by tak bylo možno zavedením dodatečného softwarového ofsetu + 0.1 mV k již existujícímu hardwarovému ofsetu + 0.6 mV dosáhnout pro linearitu ± 0.2 % měřicího rozsahu 30 mA až 30 A. (Je však jistě pravděpodobné, že je vlastní ofset převodníku teplotně závislý a že nelinearita v oblasti nízkých proudů bude tudíž též závislá na teplotě).

Rozpiska součástek :

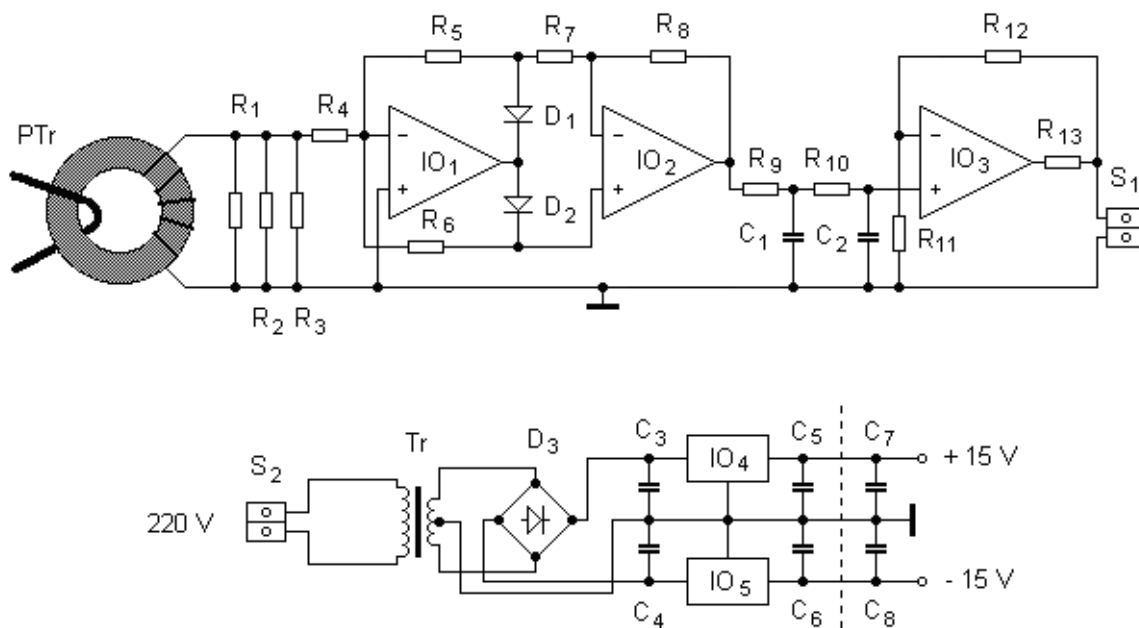
R ₁	56R/0,5W
R ₂	hodnota podle textu
R ₃	hodnota podle textu
R ₄	1K8
R ₅ až R ₈	10K
R ₉ , R ₁₀	82K
R ₁₁	68K
R ₁₂	39K
R ₁₃	100R
C ₁ , C ₂	680n plastový
C ₃ , C ₄	200M/35V elektrolyt
C ₅ až C ₆	10n keramický
IO ₁ až IO ₃	OP07CP
IO ₄	78L15
IO ₅	79L15
D ₁ , D ₂	KA221
D ₃	diodový usměrňovací můstek
S ₁ , S ₂	dvojsvorka do DPS
Tr	miniaturní síťový transformátor 2x15V 1,8W do DPS
PTr	proudový transformátor P MEC PPT4/H 1000



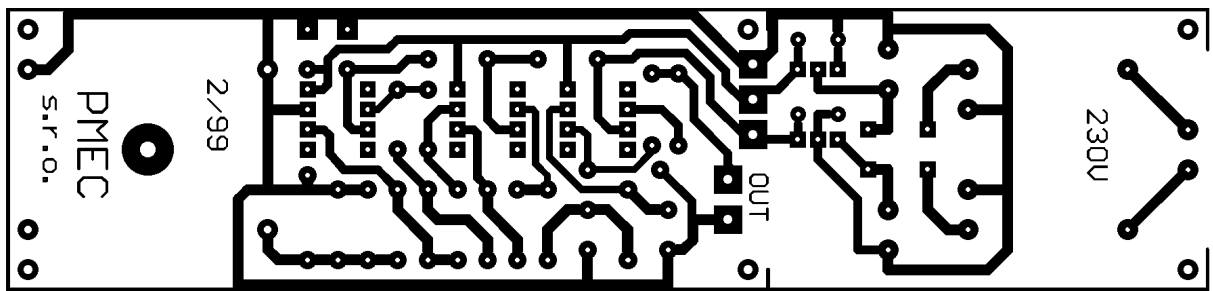
Obr.1 Vzhled, rozměry a zapojení vývodů proudového transformátoru PPT4/H 1000



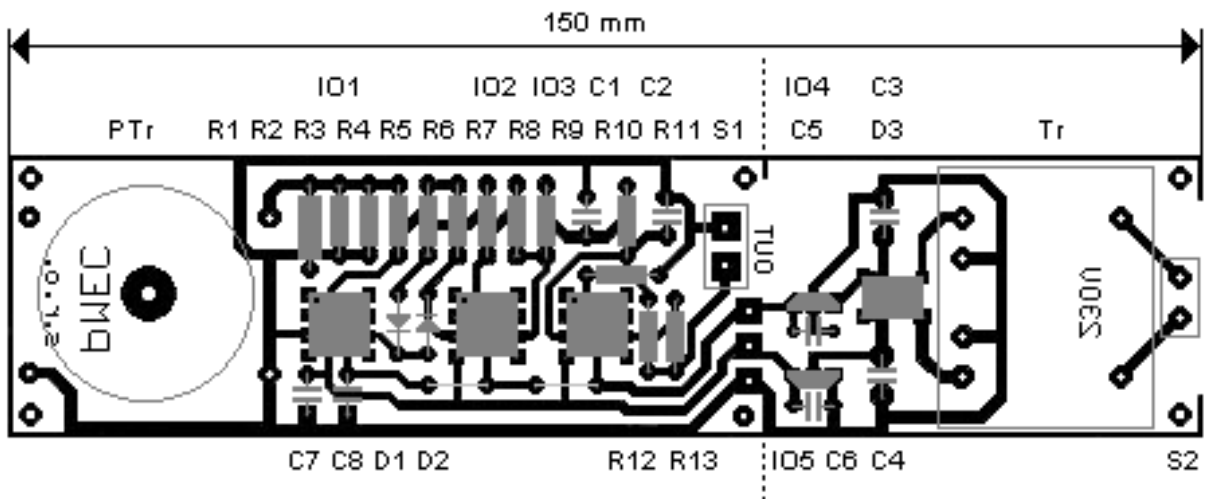
Obr. 2 Linearita proudového transformátoru a celého převodníku



Obr. 3 Zapojení převodníku 30 A_{ef} / 12 V_{ss}



Obr. 4 Plošný spoj převodníku



Obr. 5 Osazovací plán převodníku