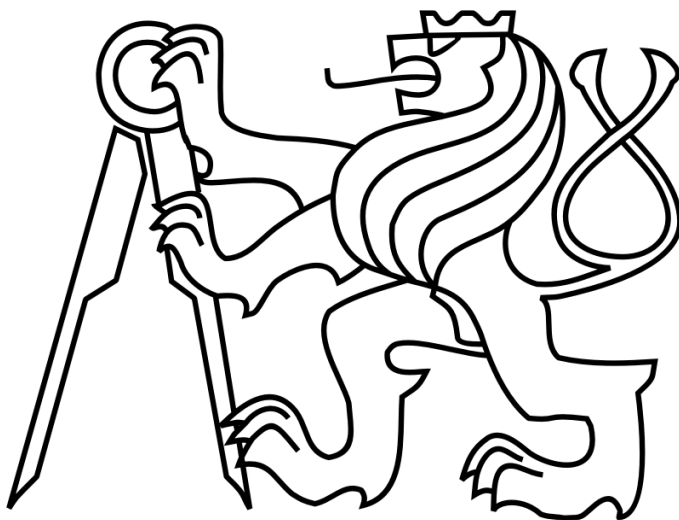


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**



**TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI**



České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra měření

**Pavel Mlejnek**

**BEZKONTAKTNÍ METODY MĚŘENÍ PROUDU PRO STANOVENÍ  
VÝKONU ODOLNÉ PROTI VNĚJŠÍMU OVLIVNĚNÍ**

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Měřicí technika

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, únor 2012

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na katedře měření Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Pavel Mlejnek  
Katedra měření  
Fakulta elektrotechnická ČVUT  
Technická 2, 166 27 Praha 6

Školitel: Doc. Ing. Petr Kašpar, CSc.  
Katedra měření  
Fakulta elektrotechnická ČVUT  
Technická 2, 166 27 Praha 6

Oponenti: .....

.....

.....

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba disertace se koná dne ..... v ..... hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Měřicí technika v zasedací místnosti č ..... Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

předseda komise pro obhajobu disertační práce  
ve studijním oboru  
Měřicí technika  
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

## OBSAH

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	5
1.1 Měření odběru elektrické energie	5
1.2 Metody měření proudu	7
2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	8
3. METODY ZPRACOVÁNÍ	9
3.1 Analýza vlastností měřicího transformátoru proudu	9
3.2 Analýza některých situací ovlivňujících funkci elektroměru	13
3.3 Detekce vnějšího narušení na základě harmonické analýzy	18
4. VÝSLEDKY	20
5. ZÁVĚR	21
Seznam v tezích použité literatury	23
Seznam prací disertanta vztahujících se k disertaci	24
Seznam ostatních publikací	27
Ohlasy	28
RESUMÉ	31

## 1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

### 1.1 Měření odběru elektrické energie

S masivním rozšířením elektrické energie do domácností a průmyslu vyvstal požadavek na měření dodané elektrické energie. Mezi první a nejrozšířenější elektroměry patří indukční elektroměry. Ty jsou v dnešní době stále více vytlačovány elektronickými elektroměry. Nicméně v současné době lze u odběratelů elektrické energie nalézt přístroje využívající obě metody měření.

*Indukční elektroměry* využívají pro svoji funkci otočný hliníkový kotouček, který je umístěn ve vzduchové mezeře dvojice elektromagnetů. Pohybový moment kotoučku je vyvolán interakcí vířivých proudů, indukovaných jedním elektromagnetem a magnetickým polem druhého elektromagnetu [1]. Výsledný pohybový moment je pak přímo úměrný činnému výkonu na zátěži a spotřebovaná elektrická energie je úměrná počtu otáček kotoučku.

Výhodou těchto elektroměrů je jejich poměrně jednoduchý princip, uspokojivá přesnost, nízká cena a jejich schopnost pracovat při velkých změnách výkonů a okolního prostředí řadu let. Mezi jejich nevýhody lze zařadit pohyblivost se mechanické části (malá mechanická odolnost), velké chyby měření v obvodech s neharmonickými proudy a napětími a také fakt, že nemohou měřit výkon stejnosměrného proudu. Velmi silným ss magnetickým polem, např. polem permanentního magnetu, lze ovlivňovat rychlost otáčení kotoučku, a tím ovlivňovat přesnost měření. Zdrojem záporné chyby měření může být i přesycení magnetického obvodu napěťové cívky vnějším magnetickým polem.

*Elektronické (statické) elektroměry* mají oproti indukčním několik výhod. Obecně lze říci, že jsou přesnější v mnohem širším proudovém a frekvenčním rozsahu. Mají menší vlastní spotřebu, menší závislost na okolních rušivých vlivech (teplota, čas atd.) a neobsahují žádné pohyblivé mechanické prvky. Dále umožňují větší variabilitu doplňkových funkcí a měření dalších parametrů dodávané/spotřebované elektrické energie (velikost napětí a proudu, jalový a zdánlivý výkon, typ zátěže, účinník atd.). Elektronické elektroměry lze podle způsobu výpočtu výkonu a dalšího zpracování rozdělit na dvě podskupiny.

*Elektroměry s analogovou násobičkou* mohou pro násobení obou signálů využívat různé principy, ale nejčastěji používané bývají násobičky na principu Hallovy sondy. Elektroměr s Hallovou násobičkou využívá Hallův jev [2], kde magnetické pole  $B$  působící na polovodičovou destičku je generováno pevnou cívkou, kterou protéká měřený proud. Pomocný proud pro Hallovu sondu je úměrný měřenému napětí.

Hallovo napětí je pak přímo úměrné součinu proudu a napětí na zátěži, tedy okamžitému výkonu. Pro získání údaje o spotřebované energii, je nutné tento výkon integrovat v čase. Zde se nejčastěji používá převodník napětí-frekvence a výstupní pulsy jsou čítány čítačem.

Výhodou těchto elektronických elektroměrů je jejich širší kmitočtové pásmo a také tyto elektroměry umožňují měřit spotřebu elektrické energie i pro proudy s nenulovou stejnosměrnou složkou.

*Elektroměry s číslicovým zpracováním signálu* získávají informace o spotřebované energii v několika krocích: měření a digitalizace okamžité hodnoty elektrického proudu a napětí, výpočet okamžitého výkonu z těchto hodnot, časová integrace výkonu. Rozhodujícími prvky pro přesnost, stabilitu a odolnost celého elektroměru jsou pak senzory napětí a proudu.

Napětí lze většinou (u běžných elektroměrů) vzorkovat přímo analogově-číslícovým převodníkem s použitím vhodného kompenzovaného

napětového děliče, a proto s měřením napětí nebyvají, na rozdíl od měření proudu, problémy.

## 1.2 Metody měření proudu

Měření proudu v elektroměrech přináší obecně mnohem více problémů než měření napětí. Je to dáno mimo jiné tím, že velikost měřeného proudu je proměnná ve velkém rozsahu, typicky od desítek mA do desítek A. Komplikace přinášejí i výkonové ztráty na snímacích rezistorech nebo ve feromagnetických materiálech použitých v senzorech.

Důležitým parametrem senzorů proudu v elektroměrech je odolnost vůči vnějšímu ovlivnění. Nejpřesnější měřicí přístroje jsou obecně náchylné na vlivy okolního prostředí a protože cena spotřebované energie může tvořit podstatnou část nákladů spotřebitele, vyskytují se nezdědky případy, kdy jsou měřicí přístroje úmyslně ovlivňovány ze strany spotřebitele tak, aby měřily špatně nebo neměřily vůbec. Tyto případy nutí výrobce elektroměrů hledat principy měření, které jsou méně přesné, ale robustnější.

Metody měření proudu lze rozdělit na:

- přímé – měření úbytku napětí na referenčním rezistoru
- nepřímé – využívající měření magnetického pole kolem vodiče

Většina výrobců elektroměrů již nyní upouští od používání bočníků přímo v měřeném obvodu a ve svých výrobcích používají bezkontaktní senzory proudu. Mezi nejznámější senzory proudu lze zařadit proudové transformátory, Rogowskiho cívky, Hallovy sondy, magnetorezistory aj. Všechny tyto principy využívají magnetické pole, které je vyvoláno protékajícím proudem ([3],[4],[5]).

Obecně lze říci, že senzory bez feromagnetických materiálů vykazují velmi dobrou linearitu a nelze je nasytit externím magnetickým polem. Na druhou stranu jsou méně citlivé a mnohdy je měření závislé na poloze vodiče měřeného proudu.

Naproti tomu u senzorů s feromagnetickými jádry nebo koncentrátoři magnetického pole je potlačen vliv polohy vodiče a mají větší citlivost. Jejich nevýhodou je nelineární charakteristika, existence oblasti nasycení a ztráty v magnetickém obvodu. Tyto senzory lze nasytit externím magnetickým polem a tím podstatně zhoršit jejich jinak dobré vlastnosti.

Výrobci elektroměrů se snaží hledat kompromis mezi cenou přístroje, odolností a přesností. Jako dosud nejlepší senzor proudu, který splňuje všechna tato kritéria, se jeví měřicí transformátor proudu, který je obsažen v drtivé většině elektronických elektroměrů. Tyto proudové transformátory většinou obsahují jádro z materiálu s lineární hysterezní smyčkou, který lze

obtížně nasytit stejnosměrným magnetickým polem. Tím zaručují velkou odolnost. Jejich přesnost je nižší a jejich cena je přijatelná. Nicméně tím, že se na trh dostávají i další výrobci, je snaha tuto cenu tlačit stále níže a kvalitní transformátory nahrazovat horšími, ale stále vyhovující platným normám.

S dalšími, výše zmíněnými, senzory proudu se lze v komerčních elektroměrech pro průmysl a domácnost setkat jen výjimečně. Je to dáno především jejich cenou, která je stále mnohem vyšší.

## **2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE**

Cílem disertační práce je podrobná analýza stávajících možností měření proudu z hlediska jejich využití ve vstupních proudových obvodech elektroměrů, kde jsou kladeny specifické požadavky na přesnost měření, spolehlivost a vysokou odolnost proti okolnímu rušení. Mezi mimořádné vlastnosti, které jsou u proudových obvodů elektroměru sledovány, patří schopnost správně, resp. s přijatelnou chybou zpracovat průběh proudu se stejnosměrnou složkou a odolávat úmyslnému ovlivnění správné funkce. Vzhledem k velkému množství vyráběných a instalovaných elektroměrů jsou zde rovněž značné požadavky na nízkou cenu proudových senzorů.

Uvedené cíle práce lze rozdělit do následujících dílčích částí:

- teoretický popis vlivu stejnosměrné složky měřeného proudu na výpočet výkonu a dalších parametrů
- analýza základních parametrů maximálního počtu vyráběných proudových transformátorů, charakterizace jejich vlastností a stanovení parametrů důležitých pro správnou funkci v elektroměrech
- teoretický popis a experimentální ověření chování měřicího transformátoru proudu při vyšších frekvencích měřeného proudu
- doporučení metod, jak předcházet chybám či jak detekovat úmyslné nebo neúmyslné ovlivnění funkce elektroměru za podmínky použitelnosti v praxi, včetně přihlídnutí k vlivu těchto metod na výslednou cenu celého přístroje
- analýza možností použití vzduchových cívek a možností jejího praktického provedení, vytipování důležitých vlastností cívek, které jsou rozhodující pro jejich případné použití v elektroměrech
- proměření parametrů senzorů proudu založených na vzájemné indukčnosti - vzduchové cívky, cívky realizované na desce plošného spoje



### 3. METODY ZPRACOVÁNÍ

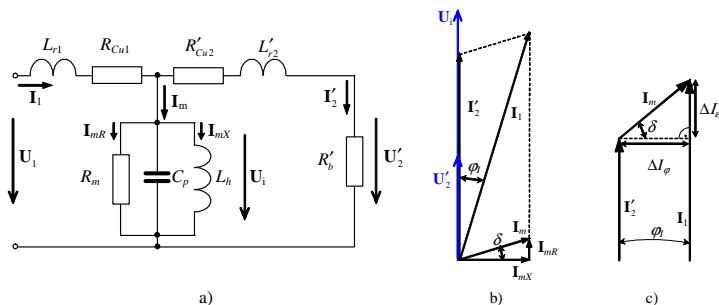
#### 3.1 Analýza vlastností měřicího transformátoru proudu

##### *Princip měřicího transformátoru proudu*

Měřicí proudový transformátor obsahuje jádro z magnetického materiálu s vysokou permeabilitou. Většinou se používají toroidní jádra vinutá z tenkých pásků Permalloye, nanokrystalických nebo amorfních materiálů. Vinutím z tenkých pásků se minimalizují ztráty vířivými proudy.

Na magnetickém jádru jsou navinuta dvě vinutí. U proudových transformátorů používaných v elektroměrech bývá primární vinutí velmi často tvořeno pouze jedním vodičem velkého průřezu a sekundární vinutí má počet závitů v řádech tisíců (nejčastěji 2500 nebo 1000). Poměr jmenovitého primárního proudu  $I_{1jm}$  k jmenovité hodnotě sekundárního proudu  $I_{2jm}$  je dán poměrem počtu závitů sekundárního  $N_2$  a primárního vinutí  $N_1$  a označuje se jako převod transformátoru  $p_I$ .

Na obr. 3-1 a) je uvedeno zjednodušené schéma proudového transformátoru. Kompletní popis náhradního schématu měřicího transformátoru proudu lze nalézt např. v [6].



**Obr. 3-1** Náhradní schéma transformátoru a), fázorový diagram napětí a proudů b) a jeho detail c)

V obr. 3-1 a) jsou všechny prvky přepočítané na primární stranu, a proto ty, které přísluší sekundární straně, jsou označeny apostrofem.

V ideálním případě, tj. kdy MTP pracuje ve stavu nakrátko, primární proud vyvolává v jádře magnetický tok, který je celý kompenzován magnetickým tokem vytvářeným sekundárním proudem, který má po přepočtu stejnou velikost. Potom magnetizační proud je roven nule a transformátor pracuje bez jakýchkoliv chyb.

V reálném případě je sekundární vinutí vždy zatíženo nenulovou impedancí (např. alespoň odpory vinutí) i při zkratovaném sekundárním

výstupu. Aby mohl touto zátěží protékat proud, je nutné, aby se na hlavní indukčnost indukovalo napětí pak příčnou větví náhradního modelu transformátoru začne protékat magnetizační proud a sekundární proud je dán vektorovým rozdílem primárního a magnetizačního proudu.

Velikost indukovaného napětí (efektivní hodnota), které zajistí potřebnou velikost sekundárního proudu při konkrétním primárním proudu, lze vypočítat z následujícího vztahu (při zanedbání rozptylové indukčnosti):

$$U_i = \frac{I_1}{p_i} \cdot (R_{cu2} + R_b) \quad (3.1)$$

Pracovní bod transformátoru se pak pohybuje po hysterezní smyčce materiálu jádra s velmi malým rozkmitem intenzity magnetického pole, který je tím menší, čím je větší amplitudová permeabilita jádra  $\mu_a$ .

Protože jádra MTP jsou uzavřené vzorky z magneticky měkkých materiálů, lze maximální hodnotu intenzity magnetického pole uvnitř jádra vypočítat z proudu a počtu závitů (3.2), maximální hodnotu magnetické indukce z indukovaného napětí (3.3) a použitím těchto dvou hodnot lze určit i amplitudovou permeabilitu (3.4).

$$H_m = \frac{N_1 \cdot I_{1m}}{l_s} \quad (3.2)$$

$$B_m = \frac{U_{isar}}{4 \cdot N_2 \cdot S \cdot f} \quad (3.3)$$

$$\mu_a = \frac{B_m}{\mu_0 \cdot H_m} \quad (3.4)$$

kte  $l_s$  je střední délka toroidního jádra,  $U_{isar}$  aritmetická střední hodnota indukovaného napětí,  $S$  příčný průřez jádra,  $f$  je frekvence a  $\mu_0$  je permeabilita vakua.

### **Amplitudová a fázová chyba**

Relativní amplitudová chyba  $\varepsilon_i$  je definována jako rozdíl délky fázorů sekundárního a primárního proudu ku proudu primárnímu (obr. 3-1 b)). Fázová chyba  $\varphi_i$  je definována jako rozdíl úhlů sekundárního a primárního fázoru proudu (obr. 3-1 b)). Chyba je tedy kladná, když fázor sekundárního proudu předbíhá fázor primárního proudu. Pokud jsou proudy neharmonické, pak pro účely této práce, je fázová chyba definována z fázorů prvních harmonických obou proudů.

Protože chyby transformátorů bývají velmi malé a fázory  $\mathbf{I}_1$  a  $\mathbf{I}'_2$  se jen nepatrně liší svojí délkou a úhlem, lze považovat za rozdíl jejich délek hodnotu  $\Delta I_\varepsilon$  podle obr. 3-1 c). Amplitudovou a fázovou chybu pak lze vyjádřit:

$$\varepsilon_I \doteq -\frac{\Delta I_\varepsilon}{|\mathbf{I}_1|} \cdot 100 = -\frac{I_m \cdot \sin \delta}{I_1} \cdot 100 \quad (3.5)$$

$$\varphi_I \doteq \arctan\left(\frac{\Delta I_\varphi}{|\mathbf{I}_2|}\right) \doteq \arctan\left(\frac{I_m \cdot \cos \delta}{I_1}\right) \quad (3.6)$$

kde  $\delta$  je ztrátový úhel feromagnetika a je definovaný:

$$\delta = \arctan\left(\frac{I_{mR}}{I_{mX}}\right) = \arctan\left(\frac{\omega \cdot L_h}{R_m}\right) \quad (3.7)$$

Oba vztahy (3.5) a (3.6) jsou vhodné především pro nepřímé měření amplitudové a fázové chyby. Po dalších úpravách lze dospět ke vztahu, kde již figurují jen parametry MTP a snímací odpor.

$$\varepsilon_I \doteq -\frac{N_1 \cdot (R_{Cu2} + R_b) \cdot I_s \cdot \sin \delta}{2\pi \cdot N_2^2 \cdot S \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_a} \cdot 100 \quad (3.8)$$

$$\varphi_I \doteq \arctan\left(\frac{N_1 \cdot (R_{Cu2} + R_b) \cdot I_s \cdot \cos \delta}{2\pi \cdot N_2^2 \cdot S \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_a}\right) \quad (3.9)$$

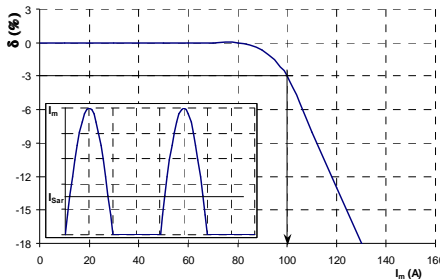
Z výsledných vztahů je patrné, že chyby transformátorů nepřímo závisí, kromě jiného, na permeabilitě jádra. Proto všechny přesné MTP používají jádra z materiálů s vysokou permeabilitou v řádech desítek až stovek tisíc, což jim zaručuje velmi malé chyby. Vysoká permeabilita však přináší malou odolnost MTP k vnějšímu ovlivnění, a proto se pro elektroměry volí vhodný kompromis.

### ***Odolnost proti stejnosměrné složce měřeného proudu***

Definice odolnosti proti stejnosměrnému poli je založena na odezvě transformátoru na jednocestně usměrněný střídavý sinusový proud. Tento proud nezpůsobuje při určování výkonu žádné problémy, pokud se pracovní bod MTP pohybuje v lineární části hysterezní smyčky (jádro MTP není v saturaci). Tato podmínka však neplatí pro jednocestně usměrněné průběhy s větší hodnotou stejnosměrné složky  $I_{Sar1}$ , která posouvá pracovní bod

do oblasti saturace, kde již dochází ke zkreslení průběhu sekundárního proudu a tudíž i ke změně indikovaného sekundárního napětí.

Stejnoseměrná odolnost (DC imunita) je podle normy [8] nebo [9] definována jako amplituda  $I_m$  jednocestně usměrněného proudu, který způsobí chybu měření výkonu větší než předdefinovaný limit, který bývá 3% nebo 6% v závislosti na třídě elektroměru (viz. obr. 3-2). U přesných MTP bývá DC imunita téměř nulová, protože tyto transformátory mají malou saturační hodnotu intenzity magnetického pole, a i velmi malá stejnosměrná složka proudu je přesytí.

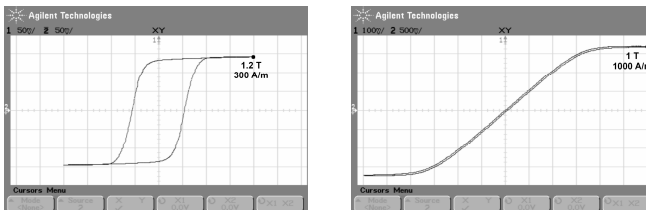


**Obr. 3-2** Grafické vyjádření DC imunity 100 A

### **Základní koncepce měřících transformátorů proudu pro elektroměry**

#### *Lineární proudový transformátor*

U MTP, kde nelze zabránit možnému narušení stejnosměrným polem, např. při použití v elektroměrech, se používají jádra s nižší permeabilitou (řádově stovky až jednotky tisíc) a velmi úzkou a téměř lineární hysterezní smyčkou s vysokou saturační hodnotou intenzity magnetického pole (viz. např. obr. 3-3 vpravo). Tímto se DC imunita zvýší na desítky až stovky ampérů.



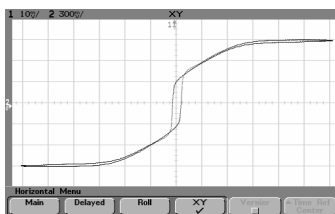
**Obr. 3-3** Příklad hysterezní smyčky „klasického“ a „DC tolerant“ MTP

Snížení permeability však způsobuje zvýšení amplitudové a fázové chyby. Zvýšení amplitudové chyby (3.8) je zanedbatelné díky závislosti na  $\sin \delta$ , naproti tomu fázová chyba (3.9) se zvýší z téměř nulové

na hodnotu jednotek stupňů (typicky kolem  $4^\circ$ ). Díky lineární hysterezní smyčce je tato chyba téměř konstantní, a proto ji lze poměrně jednoduše kompenzovat externími elektronickými součástkami nebo přímo při číslicovém zpracování.

#### *Dvoujádrový proudový transformátor*

Další metodou, jak dosáhnout výborné přesnosti při měření proudu a zároveň dosáhnout velké odolnosti vůči stejnosměrnému poli, je použití dvoujádrového MTP tak, jak to již dnes někteří výrobci dělají. Obr. 3-4 zobrazuje příklad hysterezní smyčky dvoujádrového MTP.



**Obr. 3-4** Hysterezní smyčka dvoujádrového MTP

Základní princip je ten, že jádro se skládá ze dvou prstenců, které jsou přiloženy vedle sebe nebo na sobě a sekundární vinutí obepíná obě jádra. Uspořádání jader má pak vliv na přesnost a stejnosměrnou odolnost viz. [10]

Výhodou tohoto řešení proti použití jednoho lineárního jádra je, že oba použité materiály nemusí být tak kvalitní, aby byly zaručeny požadované vlastnosti (dle norem EN např. [8],[9],[11]), a tak se významně snížila cena.

Dvoujádrové transformátory vykazují velmi malou amplitudovou a fázovou chybu, protože bez stejnosměrného pole se pracovní bod pohybuje po hysterezní smyčce jádra s vysokou permeabilitou.

Pokud je MTP vystaven stejnosměrnému magnetickému poli, ať již od stejnosměrné složky primárního proudu nebo od permanentního magnetu, dojde k saturaci jádra s vysokou permeabilitou a pak se uplatní pouze jádro s nízkou permeabilitou. Tím dojde k téměř skokové změně permeability a tím také k významné změně především fázové chyby.

### **3.2 Analýza některých situací ovlivňujících funkci elektroměru**

#### ***Stejnoseměrný proud v obvodu MTP***

Při správné funkci MTP, tj. při střídavém buzení, se pracovní bod pohybuje kolem počátku po hysterezní smyčce materiálu jádra. Rozkmit ve směru intenzity magnetického pole je dán pouze střední délkou siločáry a velikostí magnetizačního proudu, který je poměrně malý.

Pokud však MTP poteče stejnosměrný proud, nebo střídavý proud s nenulovou střední hodnotou, pak tento proud nebude kompenzován žádným indukovaným sekundárním proudem. Toto způsobí posuv pracovního bodu po hysterezní smyčce. V okamžiku, kdy se pracovní bod dostane do oblasti větší nelinearity hysterezní smyčky (např. saturace) a malá hysterezní smyčka pak bude zasahovat do této oblasti, dojde ke snížení amplitudové permeability a to až o několik řádů. Takto prudká změna permeability vyvolá nárůst chyb a v krajním případě transformátor přestane fungovat úplně.

### ***Jednocestně usměrněný proud***

Jednocestně usměrněný proud je nejčastější zdrojem stejnosměrného proudu v MTP a zároveň je na něm založena definice odolnosti proti stejnosměrnému poli. Je tedy důležité vědět, jak se jeho vliv projeví na hodnotách proudu a výkonu především na a sekundární straně MTP.

Jednocestně usměrněný průběh na primární straně s amplitudou  $I_m$  má střední hodnotu  $I_{ss1U}$  a efektivní hodnotu  $I_{ef1U}$  dány vztahy:

$$I_{ss1U} = \frac{I_m}{\pi} \quad (3.10)$$

$$I_{ef1U} = \frac{I_m}{2} \quad (3.11)$$

Srovnáním této efektivní hodnoty s hodnotou pro neusměrněný sinusový průběh lze zjistit, že efektivní hodnota při jednocestném usměrnění poklesne  $\sqrt{2}$ -krát.

Protože MTP nepřenáší stejnosměrnou složku primárního proudu, musí se nutně lišit efektivní hodnoty proudů na primární a sekundární straně. Efektivní hodnota proudu na sekundární straně je pak dána vztahem:

$$I_{ef2U} = \frac{I_m}{2\pi} \cdot \sqrt{\pi^2 - 4} \quad (3.12)$$

Tato hodnota je menší než na primární straně, a proto je zajímavé zjistit, jaký to bude mít vliv na celkový měřený výkon.

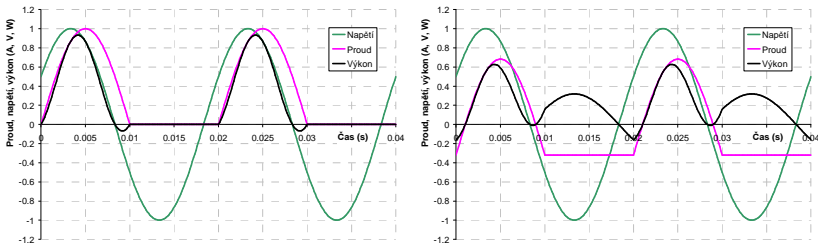
### ***Vliv usměrnění na hodnoty výkonu a účinnku***

Pro výkon jednocestně usměrněného proudu při sinusovém napětí na primární straně lze odvodit vztah:

$$P_{1U} = \frac{U_m I_m}{4} \cdot \cos \varphi_Z \quad (3.13)$$

Grafické znázornění primárního proudu, napětí a okamžitého výkonu je na obrázku obr. 3-5 vlevo (při  $\varphi_z = 30^\circ$ ).

Z odvození výkonu na sekundární straně vyplyne stejný vztah jako v předchozím případě i přesto, že stejnosměrná složka je transformátorem proudu odstraněna. Vysvětlením stejné střední hodnoty výkonu za periodu je nenulový výkon v druhé půlperiodě signálu, jak je patrné na následujícím obrázku vpravo.



**Obr. 3-5** Průběh proudu, napětí a výkonu na primární (vlevo) a sekundární straně (vpravo) MTP

Některé elektroměry zobrazují kromě standardních údajů o spotřebě elektrické energie také údaje o napětích, proudech, výkonech a účinních jednotlivých fází. Proto je také zajímavý vliv jednocestně usměrněného proudu na účinník.

V praxi se v elektroměrech většinou používá definice účinníku vycházející z poměru činného výkonu  $P$  a zdánlivého výkonu  $S$ :

$$PF = \cos \varphi_z = \frac{P}{S} \quad (3.14)$$

Tím, že poklesnou efektivní hodnoty primárního i sekundárního proudu, dojde také ke změně zdánlivého výkonu. Hodnoty účinníku na primární a sekundární straně MTP pak lze vyjádřit:

$$PF_{1U} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \cos \varphi_z \quad (3.15)$$

$$PF_{2U} = \frac{\pi}{\sqrt{2(\pi^2 - 4)}} \cdot \cos \varphi_z \quad (3.16)$$

Z výsledných vztahů jasně plyne, že jednocestně usměrněný průběh proudu snižuje zobrazovanou hodnotu účinníku a to může vést k chybnému

vyhodnocení charakteru zátěže, navzdory tomu, že se charakter zátěže nemění.

Jako příklad lze uvést čistou reálnou zátěž  $\varphi_Z = 0^\circ$  a tedy  $PF = 1$ . Pokud je tato zátěž napájena jednocestně usměrněným proudem, pak fázový posuv na primární straně MTP, podle vztahu (3.14), vychází  $\varphi_Z = 45^\circ$  a na sekundární straně (tedy ten, který ukazuje elektroměr)  $\varphi_Z = 23,5^\circ$ .

### ***Vliv nesymetrického proudu na tvar napětí***

Předchozí vztahy pro měřený výkon byly odvozeny za podmínky sinusového průběhu napětí bez stejnosměrné složky. Ve skutečnosti je ovšem nutné počítat s vnitřní impedancí sítě, která způsobuje pokles napětí.

Pokud je proud odebírán pouze v jedné polaritě, pak je také napětí v této polaritě více zatěžováno a způsobuje větší pokles. To se projeví tím, že se i v napětí objeví stejnosměrná složka, která potom zkresluje výsledky měření.

Pro odvození lze opět vyjít ze základní definice výkonu, do které se dosadí výrazy popisující napětí a proud. Výkon na primární a sekundární straně je pak dán:

$$P'_{1U} = P_{1U} - k \frac{U_m I_m}{\pi} = P_{1U} - U_{ss} I_{ss} \quad (3.17)$$

$$P'_{2U} = \frac{U_m I_m}{4} \cdot \cos \varphi_Z = P_{1U} \quad (3.18)$$

Konstanta  $k$  je dána poměrem stejnosměrné složky napětí  $U_{ss}$  a jeho maximální hodnoty  $U_m$ .

Z uvedených vztahů plyne závěr, že poklesem napětí pouze v jedné půlperiodě je do zátěže dodáván nižší výkon (snížený o stejnosměrný výkon) avšak na sekundární straně MTP se tento pokles neprojevuje a tudíž elektroměr ukazuje větší výkon, než je ve skutečnosti dodáván do zátěže.

Relativní chybu měření lze vyjádřit vztahem:

$$\delta_p = \frac{4k}{\pi \cos \varphi_Z - 4k} \cdot 100\% \quad (3.19)$$

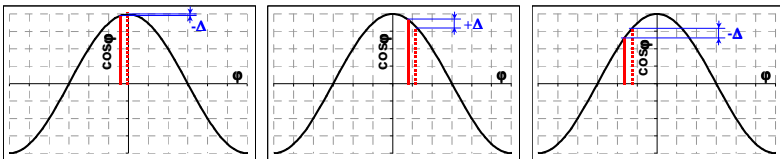
Ve většině případů, kdy  $k < 0,1$  a  $\cos \varphi_Z > 0,15$ , je chyba kladná a tedy elektroměr měří víc než je skutečná spotřeba. Chyba může nabývat hodnot od jednotek až po desítky procent v závislosti na velikosti  $k$  a  $\cos \varphi_Z$  (v blízkosti singularity pak roste nade všechny meze).



### Měření výkonu na indukčních a kapacitních zátěžích

Pokud je dvoujádrový MTP použit v elektroměru, který měří výkon na kapacitní nebo induktivní zátěži, dochází ke značnému zvýšení chyb měření výkonu, obsahuje-li měřený proud stejnosměrnou složku [12]. Příčinou tohoto jevu je fakt, že při nasycení jádra s vysokou permeabilitou je veškerý magnetický tok veden jádrem s nízkou permeabilitou, které má nenulovou fázovou chybu, která navíc může kolísat v rozsahu několika stupňů v závislosti na velikosti stejnosměrného buzení jádra.

Fázová chyba se přidává k fázovému posuvu mezi napětím a proudem na zátěži a tím dochází i ke změně měřeného výkonu na sekundární straně MTP. Protože činný výkon je úměrný  $\cos(\varphi_z - \varphi_l)$ , projeví se tato přídavná chyba především pro větší hodnoty  $\varphi_z$  (viz obr. 3-6).



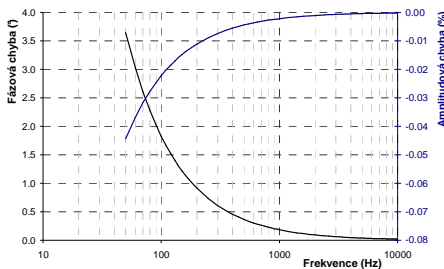
Obr. 3-6 Grafické znázornění vzniku přídavné chyby  
a) reálná, b) induktivní a c) kapacitní zátěž

Přestože aditivní chyba dosahuje dosti velkých hodnot (dokonce i kladných, tj. může dojít k účtování vyšší spotřeby než ve skutečnosti je), splňují elektroměry, které používají dvoujádrové MTP, předepsané technické normy ([8],[9]). Tyto normy předepisují jistou odolnost proti stejnosměrnému proudu a stejnosměrnému vnějšmu magnetickému poli, avšak všechny tyto požadavky jsou stanoveny pro reálnou zátěž, tedy pro  $\cos \varphi_z = 1$ , kde je přídavná chyba velmi malá.

### Frekvenční závislosti proudových transformátorů

Přestože proudové transformátory určené pro použití v elektroměrech jsou optimalizovány pro pracovní frekvenci 50/60 Hz, mohou nastat případy, kdy je důležité vědět, jak se tyto transformátory chovají pro frekvence vyšší. Jedním z těchto případů je měření primárního proudu, který obsahuje vyšší harmonické (odběry spínaných zdrojů a pod.), kde mohou uživatele zajímat jejich výkony případně kompletní harmonická analýza průběhu a hlídání kvality dodávané energie.

Frekvenční chování chyb transformátorů lze odvodit ze vztahů pro tyto chyby. Grafické znázornění obou chyb MTP v závislosti na frekvenci je na následujícím obrázku. Je patrné, že obě chyby se zvyšující se frekvencí velmi rychle klesají k nule.



**Obr. 3-7** Teoretický průběh ampl. a fáz. chyby MTP v závislosti na frekvenci

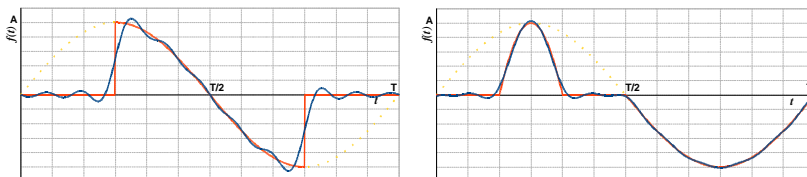
Výše uvedené průběhy velmi dobře odpovídají naměřeným průběhům přibližně do 1000 Hz. Od této frekvence se již začínají uplatňovat parazitní kapacity  $C_p$ , a dochází k rezonanci. Kvůli těmto vlivům, které jsou také ovlivněny např. polohou primárního vodiče, polohou sekundárních vývodů apod., může fázová chyba kolísat v řádech několika desetin stupně a může tak změnit i znaménko.

### 3.3 Detekce vnějšího narušení na základě harmonické analýzy

Tato metoda nevyžaduje žádné dodatečné úpravy již stávajících elektroměrů s číslicovým zpracováním signálu a spočívá pouze v úpravě vnitřního programu o výpočet frekvenčního spektra. Tab. 3-1 (1. řádek) zobrazuje prvních deset harmonických složek jednocestně usměrněného sinusového signálu vztahených k amplitudě první harmonické.

Z uvedených hodnot je zřejmé, že jednocestně usměrněný proud má poměrně vysokou amplitudu druhé harmonické, která je přibližně 42% amplitudy první harmonické. Teoreticky tedy lze z harmonické analýzy určit, zda je MTP vystaven jednocestně usměrněnému proudu či nikoliv.

Bohužel lze dokázat, že proud, který obsahuje 2. harmonickou, nemusí mít vždy stejnosměrnou složku. Jednou z možných funkcí která ji nemá je např. průběh z obr. 3-8 vlevo.



**Obr. 3-8** Signál bez ss složky – vlevo a signál „bez“ 2. harm. – vpravo (červený – ideální, modrý – prvních 10 harm.)

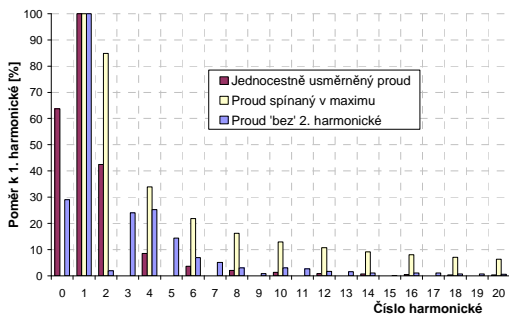
Na druhé straně, byl experimentálně nalezen průběh, který má stejnosměrnou složku a má tedy sudé harmonické, ale amplituda 2. harmonické je velmi malá (cca 2% první harmonické). Nalezený průběh je na obr. 3-8 vpravo. Porovnání amplitud jednotlivých harmonických u všech tří analyzovaných průběhů je v tab. 3-1 a graficky v obr. 3-10.

**Tab. 3-1** Poměr amplitud harmonických – pro analyzované průběhy

$A_k/A_1$ (%)	ss	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1-cest. usm.	63,7	100	42,4	0	8,5	0	3,6	0	2,0	0	1,3
bez ss složky	0	100	84,9	0	34,0	0	21,8	0	16,2	0	12,9
bez 2. harm	29,1	100	2,0	24,1	25,3	14,4	7,0	5,2	3,1	0,8	3,1

Z předchozích výsledků vyplývá, že při harmonické analýze je nutné kromě druhé harmonické sledovat i vyšší harmonické, především sudé, které indikují, že tvar odbíraného proudu není v obou půlperiodách stejný a měřený proud by tak mohl obsahovat stejnosměrnou složku.

Nutno ještě podotknout, že metoda detekce ovlivnění na základě harmonické analýzy je použitelná pouze, dokud pracovní bod MTP je stále v lineární oblasti a nedochází ke zkreslení vlivem saturace. Posune-li se pracovní bod do saturační oblasti, pak jsou poměry harmonických ovlivněny rovněž tímto faktem.



**Obr. 3-10** Srovnání velikostí harmonických u všech analyzovaných průběhů

Další problém přináší situace, kdy je současně s odběrem přes diodu odebírán také proud normálně. Pak se opět změní poměr první a dalších harmonických v závislosti na velikosti odběru obou větví. Lze však předpokládat, že pokud se v signálu objeví druhá harmonická, jedná se ve většině případů o jednocestně usměrněný průběh.

Závěrem lze konstatovat, že jednoznačná detekce narušení MTP z výsledků harmonické analýzy sekundárního proudu není možná, ale je

možné ji použít pro předběžné varování. Vysoce pravděpodobné je to v případě, že se sekundární proud bude blížit hodnotě jmenovitého proudu, bude obsahovat vyšší procento 2. harmonické a trvání těchto podmínek nebude krátkodobého charakteru, kdy by se mohlo jednat o přechodové děje.

## 4. VÝSLEDKY

### *Analýza transformátorů proudu*

Bylo proměřeno několik desítek dostupných MTP. Za základní orientační měření se dá považovat zobrazení hysterezní smyčky použitého jádra MTP, ze kterých se dá velmi rychle vyhodnotit, zda má smysl pro využití v DC tolerantních elektroměrech daný transformátor dále zkoumat. Vodítkem je dostatečná hodnota intenzity magnetického pole, při které dojde k nasycení a dále pak lineární smyčka, která ukazuje na konstantní fázovou chybu. Velmi rychle lze z hysterezních smyček poznat dvoujádrové transformátory. Jejich použití v elektroměrech je diskutabilní.

Na základě hysterezních smyček byly vybrány reprezentativní vzorky různých typů MTP a byla na nich provedena detailní měření. Během měření byly potvrzeny předpoklady, že u lineárních MTP, které mají nižší ale konstantní permeabilitu, je fázová chyba nenulová, ale konstantní. U dvoujádrových MTP je sice fázová chyba minimální, ale s pohybem pracovního bodu v důsledku ss magnetizace se tato chyba výrazně mění.

Měření ss odolnosti potvrdilo korelaci mezi nízkou permeabilitou a velkou hodnotou saturační intenzity magnetického pole a schopností MTP pracovat pod vlivem poměrně velké stejnosměrné složky měřeného proudu.

Dále bylo ověřeno jak snadno se dají proudové transformátory ovlivnit silným permanentním magnetem. Vše závisí opět na velikosti saturační hodnoty intenzity magnetického pole použitého jádra. U běžných typů MTP použitelných v elektroměrech lze snadno dostupným magnetem výrazně ovlivnit chování MTP, případně zcela znehodnotit měření ze vzdálenosti kolem 30-40 mm.

Výsledky frekvenčních závislostí jasně ukazují, že průběh fázové chyby velice dobře koresponduje s teoretickými předpoklady. Protože však byl proměřen statisticky malý vzorek, nelze z toho vyvozovat příliš optimistické závěry. Aby bylo možné MTP použít například pro analýzu kvality elektrické energie v moderních elektroměrech, bude nutné proměřit daleko větší počet vzorků a především z různých sérií.

Během experimentů, kde byly MTP použity jako senzory proudu pro proudové vstupy wattmetru, byly potvrzeny problémy při měření indukčních a kapacitních zátěží při současném působení stejnosměrné složky proudu. Výsledky ukazují, že použití dvoujádrových transformátorů v elektroměrech

by mělo být velmi dobře uváženo, protože nelze správně korigovat jejich chyby, které jsou způsobené stejnosměrnou složkou proudu.

Chyba se projevuje hlavně u zátěží s účinnkem nižším než 1 a není normou definována, je ale jen otázkou času, kdy se tato definice promítne i do všech norem zabývajících se tematikou elektroměrů. Chyba může dosahovat jednotek procent a může nabývat kladných i záporných hodnot.

### ***Analýza vzduchových cívek***

V rámci analýzy vzduchových cívek bylo ověřeno, že je možné vytvořit a navinout toroidní vzduchovou cívku, která by byla použitelná pro měření proudů od desítek mA po desítky ampérů. Největším problémem je dodržení homogenity vlnití a tím také omezení vlivu polohy primárního vodiče a vlivu externích střídavých proudů, které byly experimentálně ověřeny.

Vzduchové cívky tedy oproti MTP nemají problém se stejnosměrnými magnetickými poli, ale naopak s poli střídavými. Pokud se jedná o pole vnějších vodičů, které mají neměnné uspořádání (např. zbývající měřicí kanály), pak lze tyto vlivy kompenzovat. U dalších vodičů však toto nelze provést a bylo by nutné použít např. vhodné stínění celého senzoru, které však způsobí navýšení výsledné ceny.

## **5. ZÁVĚR**

### ***Naplnění cílů disertační práce***

Na základě spolupráce s firmami, které vyrábějí statické číslicové elektroměry, byl stanoven hlavní cíl a náplň disertační práce - podrobná analýza stávajících možností měření proudu z hlediska jejich využití ve vstupních proudových obvodech elektroměrů, kde jsou kladeny specifické požadavky na přesnost měření, spolehlivost a vysokou odolnost proti okolnímu rušení. Především pak schopnost správně, resp. s přijatelnou chybou zpracovat průběh proudu se stejnosměrnou složkou a odolávat úmyslnému ovlivnění správné funkce elektroměru.

V rámci tohoto cíle bylo stanoveno několik dílčích cílů, které se podařilo splnit následovně:

- *teoretický popis vlivu stejnosměrné složky měřeného proudu na výpočet výkonu a dalších parametrů*

Práce podrobně popisuje vliv stejnosměrného proudu na pracovní bod proudového transformátoru, kdy dochází k posuvu tohoto bodu po hysterezní smyčce a může tak dojít k saturaci feromagnetického jádra MTP. Na toto navazuje analýza jednocestně usměrněného proudu a jeho vlivu na měřenou hodnotu výkonu a účinnku a také vlivu na napětí v distribuční síti.

- *analýza základních parametrů maximálního počtu vyráběných proudových transformátorů, charakterizace jejich vlastnosti a stanovení parametrů důležitých pro správnou funkci v elektroměrech*

V práci je uvedeno velké množství výsledků měření parametrů proudových transformátorů, které velmi dobře potvrdily teoretické vztahy mezi tvarem hysterezní smyčky jádra, permeabilitou, fázovou a amplitudovou chybou MTP a jeho odolností proti ss magnetickému poli.

Na základě měření hysterezních smyček byly z dostupných proudových transformátorů vybrány reprezentativní vzorky. U těchto vzorků byla provedena podrobnější měření, která určila jejich fázové a amplitudové chyby, odolnost proti stejnosměrnému poli a další vlastnosti.

- *teoretický popis a experimentální ověření chování měřicího transformátoru proudu při vyšších frekvencích měřeného proudu*

Kromě zjednodušeného popisu průběhu fázové a amplitudové chyby MTP v širším frekvenčním rozsahu byly pomocí vytvořeného programu simulovány i průběhy chyb při respektování parazitních kapacit a rozptylových indukčností. Odvozené průběhy jsou srovnány s experimentálně ověřenými daty s velmi dobrou korelací.

- *doporučení metod k předcházení chybám, detekci úmyslného nebo neúmyslného ovlivnění funkce elektroměru za podmínky použitelnosti v praxi, včetně přihlídnutí k vlivu těchto metod na výslednou cenu celého přístroje*

K detekci úmyslného nebo neúmyslného ovlivnění funkce elektroměru bylo analyzováno několik možností, z nichž se jako použitelná jeví detekce na základě harmonické analýzy. Ani tato metoda však není schopna bezchybně detekce stejnosměrné složky měřeného proudu, ale může být nápomocna při vytipování potenciálních zdrojů problémů.

Detekce permanentního magnetu je s dostupnými prostředky elektroměru problematická. Možným řešením je doplnění elektroměru dalším senzorem magnetického pole, což se však promítne do celkové ceny přístroje a je nutné tedy tuto změnu zvážit.

- *analýza možností použití vzduchových cívek a možností jejího praktického provedení, vytipování důležitých vlastností cívek, které jsou rozhodující pro jejich případné použití v elektroměrech*

Byla provedena analýza možností použití a praktického provedení vzduchových cívek. V této analýze jsou zmíněny problémy spojování

konců cívek a realizace zpětného závitu, které mají zásadní vliv na odolnost proti vlivům okolních vodičů. Na předchozí problém úzce navazuje problematika přeslechů jednotlivých kanálů a v práci je popsán jejich vliv včetně možnosti kompenzace.

- *proměření parametrů senzorů proudu založených na vzájemné indukčnosti - vzduchové cívky, cívky realizované na desce plošného spoje*

Na proměření základních parametrů vzduchových cívek byla autorem disertační práce vypsána bakalářská práce [13], kde je možné si detailně prohlédnout všechny výsledky. V ní bylo proměřeno několik vzduchových cívek. Kromě toho byl otestován i profesionální systém cívek realizovaných na DPS – Mobius [14].

Z výše uvedeného vyplývá, že hlavní cíl disertační práce, i jednotlivé dílčí cíle, se podařilo úspěšně splnit.

### ***Směry pro další výzkum***

Budoucí výzkum bude směřovat k vývoji moderního elektroměru, který by kromě standardních funkcí umožňoval také podrobnou analýzu kvality odebírané energie. V rámci tohoto cíle bude nutné ještě rozšířit analýzu transformátorů při vyšších frekvencích a promítnout především fázové chyby také do výpočtu výkonů vyšších harmonických, které kvůli zkrácenému napětí mohou nabývat nezanedbatelných hodnot.

Dále by bylo dobré pokračovat v testování detekce ovlivnění na základě harmonické analýzy při nasazení v reálných podmínkách. Zde by bylo potřeba zhodnotit četnosti výskytu jednotlivých harmonických proudů z dlouhodobého hlediska. Na základě toho pak potvrdit (nebo vyvrátit) závěry uvedené v této práci.

Bez zájmu nelze nechat ani výzkum v oblasti vzduchových cívek. Ty sice ještě nedosahují potřebných parametrů, ale výzkum a vývoj v této oblasti probíhá velmi intenzivně. Dá se tedy předpokládat, že i vzduchové cívky by v budoucnosti mohly najít uplatnění na poli elektroměrů a analyzátorů sítě.

### **Seznam v tezích použité literatury**

- [1] Haasz, V. – Sedláček, M.: *Elektrická měření, přístroje a metody*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2003, ISBN 80-01-02731-7
- [2] Ďaďo, S. – Kreidl, M.: *Senzory a měřicí obvody*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1996, ISBN 80-01-02057-6
- [3] P. Ripka (ed.): *Magnetic sensors and magnetometers*. Artech House Publishers, 2001, ISBN 1-58053-057-5

- [4] Ripka, P. – Kejík, P. – Kašpar, P. – Draxler, K.: *Precise DC Current Sensors*. Proc. of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Brussels (Belgium), Vol. 2, pp. 1479–1483, 1996
- [5] Koon, W.: *Current sensing for energy metering*. IIC-China/ESC-China Conference Proceedings, pp. 321–324, 2002, ([http://www.eetasia.com/ARTICLES/2002APR/2002APR08\\_AMD\\_DSP EMS\\_TAC.PDF](http://www.eetasia.com/ARTICLES/2002APR/2002APR08_AMD_DSP EMS_TAC.PDF))
- [6] Draxler, K. – Kašpar, P. – Ripka, P.: *Magnetické prvky a měření*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1999, ISBN 80-01-01909-8
- [7] Draxler, K. – Styblíková, R.: *Use of Instrument Current Transformers in Wider Frequency Range*. Proc. of IMEKO XV World Congress, Osaka 1999 Vol. VI, pp. 113–117
- [8] Česká technická norma, ČSN EN 62053-21: *Vybavení pro měření elektrické energie (AC) – Zvláštní požadavky – Část 21: Střídavé statické činné elektroměry (třídy 1 a 2)*, Český normalizační institut, 2003
- [9] Česká technická norma, ČSN EN 50470-3: *Vybavení pro měření elektrické energie (AC) – Část 3: Zvláštní požadavky – Statické činné elektroměry (třídy A, B a C)*, Český normalizační institut, 2007
- [10] Jalmuzny, W. – Adamczewska, D. – Borowska-Banas, I.: *Measuring transformers with magnetic cores composed of different soft magnetic materials*, Abstract Book and Conference Program, 20th International Conference on Soft Magnetic Materials, Kos Island (Greece), p. 65, 2011
- [11] Česká technická norma, ČSN EN 62052-11: *Vybavení pro měření elektrické energie (AC) – Všeobecné požadavky, zkoušky a zkušební podmínky – Část 11: Elektroměry*, Český normalizační institut, 2003
- [12] F. Hermann: *Untersuchung von Zählern mit Mischkern-Stromtransformatoren*, ew – das magazin für die energie wirtschaft, Vol. 16, pp. 33–36, 2007, ([http://www.zera.de/fileadmin/dl/publications/Fehlerhafte\\_Energiemessung.pdf](http://www.zera.de/fileadmin/dl/publications/Fehlerhafte_Energiemessung.pdf))
- [13] Musil, M.: *Využití Rogowskiho cívky při měření proudu a analýza dosažených parametrů*, Bakalářská práce, FEL ČVUT, 2007, ([http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/zaverecne\\_prace/BP\\_2007\\_Musil\\_Marek\\_locked.pdf](http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/zaverecne_prace/BP_2007_Musil_Marek_locked.pdf))
- [14] *Mobius Current Sensors, Higher Functionality, Lower Cost*. Vendor Showcase at Metering Europe 2005, Barcelona, 2005

## Seznam prací disertanta vztahujících se k disertaci

### *Publikace v impaktovaných časopisech*

Mlejnek, P. - Kašpar, P.: *Drawback of Using Double Core Current Transformers in Static Watt-Hour Meters*. Sensor Letters. 2009, vol. 7, no. 3, p. 394-396. ISSN 1546-198X (1 citace<sup>1</sup>) (IF 0.602)

Mlejnek, P. - Vopálenský, M. - Ripka, P.: *AMR Current Measurement Device*. Sensors and Actuators. 2008, vol. 141, no. 1-3, p. 646-653. ISSN 0924-4247 (5 citací<sup>2</sup>) (IF 1.941)



Mlejnek, P. - Kašpar, P. - Draxler, K.: *Measurement of Ratio Error and Phase Displacement of DC Tolerant Current Transformers*. Sensor Letters. 2007, vol. 5, no. 1, p. 289-292. ISSN 1546-198X. (2 citace<sup>3</sup>) (IF 0.602)

Mlejnek, P. - Kašpar, P.: *Weak Points of Current Sensors in Static Energy Meters*. Journal of Electrical Engineering. 2010, vol. 61, no. 7/s, p. 17-20. ISSN 1335-3632 (IF 0.278)

Mlejnek, P. - Kašpar, P.: *The Phase Displacement of DC Tolerant Current Transformers under DC Biasing*. Journal of Electrical Engineering. 2008, vol. 59, no. 7/s, p. 94-96. ISSN 1335-3632 (IF 0.278)

Mlejnek, P. - Kašpar, P.: *DC Tolerance of Current Transformers and its Measurement*. Journal of Electrical Engineering. 2006, vol. 57, no. 8/S, p. 48-50. ISSN 1335-3632 (IF 0.278)

### **Publikace v recenzovaných časopisech**

Mlejnek, P. - Kašpar, P.: *Drawback of Using Double Core Current Transformers in Static Watt-Hour Meters*. Sensor Letters. 2009, vol. 7, no. 3, p. 394-396. ISSN 1546-198X (1 citace<sup>1</sup>) (IF 0.602)

Mlejnek, P. - Vopálenský, M. - Ripka, P.: *AMR Current Measurement Device*. Sensors and Actuators. 2008, vol. 141, no. 1-3, p. 646-653. ISSN 0924-4247 (5 citac<sup>2</sup>) (IF 1.941)

Mlejnek, P. - Kašpar, P. - Draxler, K.: *Measurement of Ratio Error and Phase Displacement of DC Tolerant Current Transformers*. Sensor Letters. 2007, vol. 5, no. 1, p. 289-292. ISSN 1546-198X. (2 citace<sup>3</sup>) (IF 0.602)

Mlejnek, P. - Kašpar, P.: *Weak Points of Current Sensors in Static Energy Meters*. Journal of Electrical Engineering. 2010, vol. 61, no. 7/s, p. 17-20. ISSN 1335-3632.

Mlejnek, P. - Kašpar, P.: *The Phase Displacement of DC Tolerant Current Transformers under DC Biasing*. Journal of Electrical Engineering. 2008, vol. 59, no. 7/s, p. 94-96. ISSN 1335-3632.

Mlejnek, P. - Kašpar, P.: *DC Tolerance of Current Transformers and its Measurement*. Journal of Electrical Engineering. 2006, vol. 57, no. 8/S, p. 48-50. ISSN 1335-3632.

### **Patenty**

---

### **Publikace excerptované WoS**

Mlejnek, P. - Kašpar, P.: *Drawback of Using Double Core Current Transformers in Static Watt-Hour Meters*. Sensor Letters. 2009, vol. 7, no. 3, p. 394-396. ISSN 1546-198X (1 citace<sup>1</sup>)

Mlejnek, P. - Kašpar, P.: *Detection of Disturbance of Working Conditions of Current Transformer in Energy Meters for Reduction of Unauthorized Current Consumption*. In PEDS 2009 - The Eighth International Conference on Power Electronics and Drive Systems [CD-ROM]. Taipei: IEEE Power Electronics Society - PELS, 2009, p. 284-287. ISBN 978-1-4244-4166-2.

Mlejnek, P. - Vopálenký, M. - Ripka, P.: *AMR Current Measurement Device. Sensors and Actuators*. 2008, vol. 141, no. 1-3, p. 646-653. ISSN 0924-4247 (5 citací<sup>2</sup>)

Mlejnek, P. - Kašpar, P. - Draxler, K.: *Measurement of Ratio Error and Phase Displacement of DC Tolerant Current Transformers*. *Sensor Letters*. 2007, vol. 5, no. 1, p. 289-292. ISSN 1546-198X. (2 citace<sup>3</sup>)

### ***Publikace ostatní***

Mlejnek, P. - Kašpar, P.: *Two Core Current Transformers vs. Linear Current Transformers in Wide Frequency Range*. In *SMM 20 - 20th International Conference on Soft Magnetic Materials - Abstract Book and Conference Program*. Athens: National Technical University, 2011, p. 74. ISBN 978-960-9534-14-7.

Mlejnek, P. - Kašpar, P.: *Weak Points of Current Sensors in Static Energy Meters*. In *Magnetic Measurements 2010*. Praha: Czech Technical University in Prague, 2010, p. 87. ISBN 978-80-01-04616-6.

Mlejnek, P. - Kašpar, P.: *Drawback of Using Double Core Current Transformers in Static Watt-hour Meters*. In *EMSA'08 - 8th European Magnetic Sensors & Actuators Conference*. Caen: Université de Caen, 2008, p. 110.

Mlejnek, P. - Kašpar, P.: *The Phase Displacement of DC Tolerant Current Transformers under DC Biasing*. In *Magnetic Measurements' 08*. Budapest: Hungarian Academy of Sciences, 2008, p. 41.

Mlejnek, P. - Kašpar, P.: *Current Sensors Suitable for Using in Electricity Meters*. In *ICST 2007 - The 2nd International Conference on Sensing Technology [CD-ROM]*. Palmerston North: Massey University, Institute of Information Sciences and Technology, 2007, p. 519-522. ISBN 978-0-473-12432-8.

Mlejnek, P. - Kašpar, P.: *System for Measurement and Testing of Contactless Current Sensors*. In *Soft Magnetic Materials Conference (SMM 18) - Book of Abstracts*. Cardiff, Wales: Cardiff University, Wolfson Centre for Magnetics, 2007, p. 43.

Mlejnek, P. - Kašpar, P.: *DC Tolerance of Current Transformers and its Measurement*. In *Magnetic Measurements '06 - The Book of Abstracts*. Bratislava: Slovak University of Technology, 2006, p. 24-25. ISBN 80-227-2452-1.

Mlejnek, P. - Kašpar, P. - Draxler, K.: *Measurement of Ratio Error and Phase Displacement of Current Transformers*. In *EMSA '06 - 6th European Magnetic Sensors and Actuators Conference*. Bilbao: University of the Basque Country, 2006, p. 39.

Mlejnek, P.: *Measurement of DC Tolerance of Current Transformers*. In *POSTER 2006 [CD-ROM]*. Prague: CTU, 2006

## Seznam ostatních publikací

### **Publikace v impaktovaných časopisech**

Petrucha, V. - Mlejnek, P. - Ripka, P. - Chvojka, M. - Posolda, P.: *Tester for a Space Micro-accelerometer*. Sensors and Actuators. 2010, vol. 2010, no. A162-2, p. 324-328. ISSN 0924-4247. (IF 1.941)

Tomek, J. - Mlejnek, P. - Janásek, V. - Ripka, P. - Kašpar, P. - et al.: *The Precision of Gastric Motility and Volume Sensing by Implanted Magnetic Sensors*. Sensors and Actuators. 2008, vol. 142, no. 3, p. 34-39. ISSN 0924-4247. (1 citace<sup>4</sup>) (IF 1.941)

Tomek, J. - Mlejnek, P. - Janásek, V. - Ripka, P. - Kašpar, P. - et al.: *Gastric Motility and Volume Sensing by Implanted Magnetic Sensors*. Sensor Letters. 2007, vol. 5, no. 1, p. 276-278. ISSN 1546-198X (6 citac<sup>5</sup>) (IF 0.602)

### **Publikace v recenzovaných časopisech**

Petrucha, V. - Mlejnek, P. - Ripka, P. - Chvojka, M. - Posolda, P.: *Tester for a Space Micro-accelerometer*. Sensors and Actuators. 2010, vol. 2010, no. A162-2, p. 324-328. ISSN 0924-4247.

Petrucha, V. - Mlejnek, P. - Ripka, P. - Chvojka, M. - Posolda, P.: *Tester for Space Micro-Accelerometer*. In Eurosensors XXIII: Sensors, Actuators and Micro/Nanosystems [CD-ROM]. Lausanne: Elsevier Science, 2009, ISSN 1876-6196.

Tomek, J. - Mlejnek, P. - Janásek, V. - Ripka, P. - Kašpar, P. - et al.: *The Precision of Gastric Motility and Volume Sensing by Implanted Magnetic Sensors*. Sensors and Actuators. 2008, vol. 142, no. 3, p. 34-39. ISSN 0924-4247. (1 citace<sup>4</sup>)

Tomek, J. - Mlejnek, P. - Janásek, V. - Ripka, P. - Kašpar, P. - et al.: *Gastric Motility and Volume Sensing by Implanted Magnetic Sensors*. Sensor Letters. 2007, vol. 5, no. 1, p. 276-278. ISSN 1546-198X (6 citac<sup>5</sup>)

### **Patenty**

---

### **Publikace excerptované WoS**

Petrucha, V. - Mlejnek, P. - Ripka, P. - Chvojka, M. - Posolda, P.: *Tester for a Space Micro-accelerometer*. Sensors and Actuators. 2010, vol. 2010, no. A162-2, p. 324-328. ISSN 0924-4247.

Petrucha, V. - Mlejnek, P. - Ripka, P. - Chvojka, M. - Posolda, P.: *Tester for Space Micro-Accelerometer*. In Eurosensors XXIII: Sensors, Actuators and Micro/Nanosystems [CD-ROM]. Lausanne: Elsevier Science, 2009, ISSN 1876-6196.

Tomek, J. - Mlejnek, P. - Janásek, V. - Ripka, P. - Kašpar, P. - et al.: *The Precision of Gastric Motility and Volume Sensing by Implanted Magnetic Sensors*. Sensors and Actuators. 2008, vol. 142, no. 3, p. 34-39. ISSN 0924-4247. (1 citace<sup>4</sup>)

Tomek, J. - Mlejnek, P. - Janásek, V. - Ripka, P. - Kašpar, P. - et al.: *Gastric Motility and Volume Sensing by Implanted Magnetic Sensors*. Sensor Letters. 2007, vol. 5, no. 1, p. 276-278. ISSN 1546-198X (6 citací<sup>5</sup>)

### **Publikace ostatní**

Tomek, J. - Mlejnek, P.: *Volume Sensing for On-demand Gastric Electrical Stimulation*. In POSTER 2006 [CD-ROM]. Prague: CTU, 2006

Tomek, J. - Mlejnek, P. - Janásek, V. - Kašpar, P. - Ripka, P. - et al.: *The Precision of Gastric Motility and Volume Sensing by Implanted Magnetic Sensors*. In XX Eurosensors, 20th Anniversary. Göteborg: Eurosensors, 2006, p. 254-255. ISBN 91-631-9280-2.

Tomek, J. - Mlejnek, P. - Janásek, V. - Kašpar, P. - Ripka, P. - et al.: *Volume and Motility Sensing for Implantable Gastric Pacemaker*. In IFMBE Proceedings World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2006 [CD-ROM]. Berlin: Springer-Verlag, 2006, vol. 14, p. 4943. ISBN 3-540-36839-6.

Tomek, J. - Mlejnek, P. - Janásek, V. - Ripka, P. - Kašpar, P. - et al.: *Gastric Motility and Volume Sensing by Implanted Magnetic Sensors*. In EMSA '06 - 6th European Magnetic Sensors and Actuators Conference. Bilbao: University of the Basque Country, 2006, p. 35.

Mlejnek, P. - Vopálenký, M.: *Contactless Current Measurement Device with the Anisotropic Magnetoresistors*. In POSTER 2005 [CD-ROM]. Prague: CTU, Faculty of Electrical Engineering, 2005,

Vopálenký, M. - Mlejnek, P.: *Influence of the Flipping Pulses on Noise and Stability of Anisotropic Magnetoresistors*. In 17th Soft Magnetic Materials Conference Programme and Book of Abstracts. Bratislava: Slovak University of Technology, 2005, vol. 1, p. 100.

**U všech publikací je podíl jednotlivých autorů shodný.**

### **Ohlasy**

<sup>1</sup> Ripka, P.: *Electric current sensors: a review*. Measurement Science & Technology, Volume: 21, Issue: 11, Pages: 1-23, Article Number: 11200, DOI: 10.1088/0957-0233/21/11/112001, Published: NOV 2010

<sup>2</sup> Bartok, A., Daniel, L., Razek, A.: *Micro-macro modelling of stress-dependent anisotropic magnetoresistance*. Journal of Physics D-Applied Physics, Volume: 44, Issue: 13, Article Number: 135001, DOI: 10.1088/0022-3727/44/13/135001, Published: APR 6 2011

Cubells-Beltran, M. D., Reig, C., Martos, J., et al.: *Limitations of Magnetoresistive Current Sensors in Industrial Electronics Applications*. International Review of Electrical Engineering-IREE, Volume: 6, Issue: 1, Pages: 423-429, Part: Part b, Published: JAN-FEB 2011

- Toth, B. G., Peter, L., Revesz, A., et al.: *Temperature dependence of the electrical resistivity and the anisotropic magnetoresistance (AMR) of electrodeposited Ni-Co alloys*. European Physical Journal B, Volume: 75, Issue: 2, Pages: 167-177, DOI: 10.1140/epjb/e2010-00132-4, Published: MAY 2010
- Koga, F., Tadatsu, T., Inoue, J., et al.: *A New Type of Current Sensor Based on Inverse Magnetostriction for Large Current Detection*. IEEE Transactions on Magnetics, Volume: 45, Issue: 10, Special Issue: SI, Pages: 4506-4509, DOI: 10.1109/TMAG.2009.2022187, Published: OCT 2009
- Li, XS., You, J., Shu, XY., Kang, RQ.: *Electric Current measurement using AMR Sensor Array*. 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Vols 1-7, Pages: 4085-4089, Published: 2009
- <sup>3</sup> Ripka, P.: *Electric current sensors: a review*. Measurement Science & Technology, Volume: 21, Issue: 11, Pages: 1-23, Article Number: 11200, DOI: 10.1088/0957-0233/21/11/112001, Published: NOV 2010
- Ripka, P.: *Sensors based on bulk soft magnetic materials: Advances and challenges*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume: 320, Issue: 20, Pages: 2466-2473, DOI: 10.1016/j.jmmm.2008.04.079, Published: OCT 2008
- <sup>4</sup> Elhajj, IH., Dib, N., Antoun, S., Al-Hajj, G.: *Sleeve Gastrectomy Surgical Assistive Instrument for Accurate Remnant Stomach Volume*, Journal of Medical Devices-Transactions of the Asme, Volume: 4, Issue: 2, Article Number: 025001, DOI: 10.1115/1.4001520, Published: JUN 2010
- <sup>5</sup> Lakshmanan, RS., Guntupalli, R., Hu, J., et al.: *Phage immobilized magnetoelastic sensor for the detection of Salmonella typhimurium*. Journal of Microbiological Methods, Volume: 71, Issue: 1, Pages: 55-60, DOI: 10.1016/j.mimet.2007.07.012, Published: OCT 2007
- Lakshmanan, RS., Guntupalli, R., Hu, J., et al.: *Detection of Salmonella typhimurium in fat free milk using a phage immobilized magnetoelastic sensor*. Sensors and Actuators B-Chemical, Volume: 126, Issue: 2, Pages: 544-550, DOI: 10.1016/j.snb.2007.04.003, Published: OCT 1 2007
- Shao, R., Tan, EL., Grimes, CA., et al.: *A wide-area, wireless, passive dosimeter for tracking mercury vapor exposure*. Sensor Letters, Volume: 5, Issue: 3-4, Pages: 615-620, DOI: 10.1166/sl.2007.237, Published: SEP-DEC 2007
- Yang, W., Pang, P., Gao, X., et al.: *Detection of lactose in milk samples using a wireless multi-enzyme biosensor*. Sensor Letters, Volume: 5, Issue: 2, Pages: 405-410, DOI: 10.1166/sl.2007.212, Published: JUN 2007
- Zeng, K., Roy, SC., Grimes, CA.: *Quantification of blood clotting kinetics I: Determination of activated clotting times as a function of heparin concentration using magnetoelastic sensors*. Sensor Letters, Volume: 5, Issue: 2, Pages: 425-431, DOI: 10.1166/sl.2007.217, Published: JUN 2007
- Roy, SC., Ong, KG., Zeng, K., et al.: *Quantification of blood clotting kinetics II: Thromboelastograph analysis and measurement of erythrocyte sedimentation rate using magnetoelastic sensors*. Sensor Letters, Volume: 5, Issue: 2, Pages: 432-440, DOI: 10.1166/sl.2007.218, Published: JUN 2007

## SUMMARY

The main topic of this doctoral thesis is the analysis of methods for measurement of electric current in the energy meters. European standards determine specific requirements to measurement accuracy, reliability and robustness to external disturbances. The most important property of a current sensor is the ability to measure with acceptable error a current even with dc component and under the effect of intentional tampering. Considering the amount of installed energy meters around the world there is strong demand of cheap current sensors.

The work has been carried out in close cooperation with manufacturers of current transformers (CT) and energy meters. Therefore, the results of the work have been immediately used in practice. Due to fact that air coils are rather expensive to produce, our partners have been interested mainly in the research of current transformers. Only basic measurement has been done on the air coils.

Several tens of current transformers of different manufacturers have been measured. Some of them were standard current transformers receptive to external disturbance. Other CTs were dc tolerant and they met all international standards. These CTs can be classified in two main categories: linear core CTs with almost constant phase displacement and dual core CTs which can cause problems in special conditions of measurement.

As a result of the work, it can be stated that current transformers are the most convenient transducers for energy meters, with the respect of air coils, where it is important to fulfil all requirements in the standards and low price is required. Their main disadvantage compared to air coil is the possibility to saturate the ferromagnetic core by dc magnetic flux. Dc tolerant transformers are made either from a linear core with low permeability or consist of two different permeability cores. This makes them able to operate even with quite high dc magnetic flux. Choosing dual core current transformers has to be considered carefully, due to problem with rapid change of phase displacement when the high permeability core is saturated.

The research of current sensors suitable for energy meters will be continued as well as the cooperation with our industrial partners on development of modern smart energy meter.

## RESUMÉ

Tématem disertační práce je analýza stávajících možností měření proudu z hlediska jejich využití ve vstupních proudových obvodech elektroměrů, kde jsou kladeny specifické požadavky na přesnost měření, spolehlivost a vysokou odolnost proti okolnímu rušení. Mezi mimořádné vlastnosti, které jsou u proudových obvodů elektroměru sledovány, patří schopnost správně, resp. s přijatelnou chybou, zpracovat průběh proudu se stejnosměrnou složkou a odolávat úmyslnému ovlivnění správné funkce. Vzhledem k velkému množství vyráběných a instalovaných elektroměrů jsou zde rovněž značné požadavky na nízkou cenu proudových senzorů.

Od začátku byla celá disertační práce velmi úzce svázána s firmami, které vyrábějí proudové transformátory nebo finální elektroměry, a díky tomu měly výsledky zkoumání také okamžitý praktický dopad. Vzhledem k požadavkům našich partnerů a kvůli faktu, že vzduchové cívky jsou v elektroměrech především kvůli ceně jejich výroby a rozměrům stále nepoužitelné, byl výzkum směřován hlavně na proudové transformátory. Na vzduchových cívkách, příp. na cívkách realizovaných na plošném spoji byla provedena jen základní měření jejich parametrů.

Během této disertační práce bylo více či méně detailně proměřeno několik desítek proudových transformátorů různých výrobců a různých typů: od obyčejných MTP, které byly velmi náchylné na okolní rušení, přes dvoujádrové MTP, které velmi dobře splňují kriteria definovaná v normách, až po proudové transformátory s lineárním jádrem, které sice mají poměrně vysokou fázovou chybu, ale tato chyba je konstantní a poměrně lehce kompenzovatelná.

Lze tedy konstatovat, že pro masové použití v elektroměrech, kde je potřeba splnit všechny parametry platných norem a udržet přitom co nejnižší cenu, jsou stále nejvýhodnější proudové transformátory, především díky jejich spolehlivosti, přesnosti a odolnosti. Jejich podstatnou nevýhodou je možnost přesycení feromagnetického jádra, které nehrozí u vzduchových cívek. S tím se však velmi úspěšně vypořádají tzv. „DC tolerant“ proudové transformátory, které buď obsahují jádro s nízkou permeabilitou, ale velkou hodnotou saturační intenzity magnetického pole nebo MTP s kombinací dvou jader s nízkou a vysokou permeabilitou. Použití dvoujádrových MTP je však nutné velmi pečlivě zvážit, jak plyne z výsledků této práce.

Na úplný závěr je nutné poznamenat, že výzkum v oblasti senzorů elektrického proudu ve statických elektroměrech zdaleka nekončí a spolupráce na vývoji komerčního moderního elektroměru bude nadále probíhat.