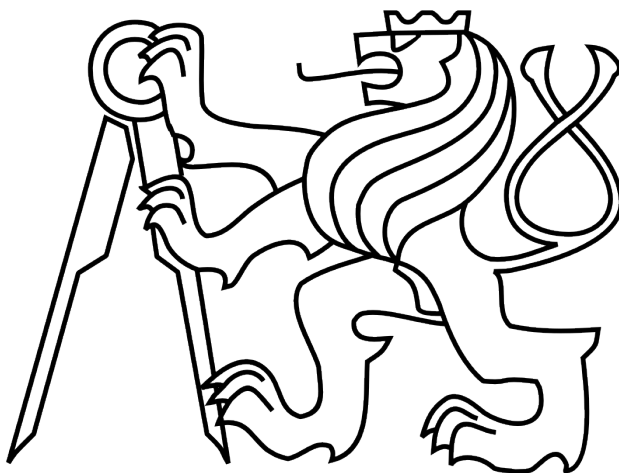


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky

Ing. Jan Hlaváček

**ANALÝZA SNÍMACÍCH PRVKŮ PROUDU V
ELEKTROENERGETICE**

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Elektroenergetika

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

Praha, únor 2011

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

Uchazeč: Ing. Jan Hlaváček

Laboratoř vysokých napětí - Katedra elektroenergetiky
Technická 2, 166 27 Praha 6

Školitel: Doc. Ing. Vladislav Kvasnička, CSc.

Laboratoř vysokých napětí - Katedra elektroenergetiky
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 Elektroenergetika v zasedací místnosti č. Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátě Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědeckou a výzkumnou činnost, Technická 2, 166 27, Praha 6.

předseda komise pro obhajobu disertační práce
ve studijním oboru Elektroenergetika
Fakulta elektrotechnická ČVUT
Technická 2, 166 27 Praha 6

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

V elektroenergetických soustavách se provádí měření stejnosměrného, střídavého a impulsního proudu na všech hladinách napětí, tj. nn, vn a vvn. U měřeného proudu je možné vyhodnocovat střední, efektivní, vrcholovou a okamžitou hodnotu. Pro měření elektrického proudu se dnes již téměř vždy využívá nepřímých metod, tedy měření transformovaného obrazu měřeného proudu.

Některé metody byly známy již na počátku 20. století, naměřené hodnoty však byly tehdy pouze informativní. V současnosti jsou metody pro měření proudu velmi přesné, dosahující přesnosti 0,5 % a lepší. Pro měření střídavých a impulsních proudů je možné použít odporové bočníky, měřicí transformátory proudu (MTP), příp. klešťové transformátory nebo Rogowského cívky (RC). Pro měření stejnosměrného proudu např. Hallovy sondy ve vzduchové mezeře magnetického obvodu klešťového ampérmetru.

1.1 PROBLEMATIKA MĚŘICÍCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU

Problematika týkající se návrhu, kalibrace a měření proudu pomocí MTP s průmyslovou pracovní frekvencí 50 Hz je zvládnutá již poměrně dlouhou dobu a je podrobně popsána např. v literatuře [1].

V případě měření proudů o vyšších frekvencích, resp. proudu o průmyslové frekvenci, který obsahuje také vyšší harmonické složky proudu, je potřeba brát v úvahu změnu převodu a úhlu měřeného proudu, aby nedocházelo k chybám např. při měření výkonu v elektroenergetických sítích [2]. Vlivem vyšších harmonických proudů na přístrojové transformátory se zabývá také [3], [4], [5]. Výskyt vyšších harmonických složek proudu v rozvodných sítích s sebou nese problémy zvýšení ztrátového výkonu např. ve výkonových transformátorech [6].

Publikovaným řešením problému změny převodu a fáze MTP při měření proudu o vyšších frekvencích je např. systém zajišťující on-line korekci chyb MTP [7]. Možnosti širokopásmového měření velkých proudů, do frekvencí řádově stovek kHz až jednotek MHz, ať již pomocí speciální konstrukce MTP nebo kombinací MTP a elektronických měničů jsou publikovány např. v [8], [9].

1.2 PROBLEMATIKA ROGOWSKÉHO CÍVEK

Témata týkající se problematiky RC jsou v posledních desetiletích poměrně často publikována vzhledem k nově se otevírajícím možnostem využití již dlouho známého principu tohoto typu senzoru proudu. RC se začíná stále více uplatňovat v praxi díky její konstrukční jednoduchosti, linearitě [10]. Dalším faktorem zvyšujícím její nasazení v měřicích systémech je dostupnost a výkon elektronických obvodů pro zpracování signálu RC. Rovněž jsou k dispozici metody umožňující jejich přesnou kalibraci od průmyslové frekvence až do desítek kHz a proudů řádově jednotek až desítek kA [11], [12].

V elektroenergetice nachází RC uplatnění v řadě aplikací, zvláště v případech, kdy je potřeba měřit proudy o vyšších frekvencích, rychlé přechodné děje, např. v systémech elektrických ochran obecně [13], [14], [15], u výkonových transformátorů [16], přenosových vedení [17], dále např. při měření přechodných dějů ve vypínačích [18], [19], odpojovačích [20] a podobně.

Problematika různých typů konstrukcí RC byla publikována například v [21]. Konstrukce strojově vyrobené RC byla popsána v článku [22], přičemž se jedná o cívku určenou pro měření velkých střídavých a přechodných proudů.

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce je zaměřena na oblast analýzy snímacích prvků proudu v elektroenergetických soustavách. V rámci svého doktorského studia jsem se podílel na projektech zaměřených především na analýzu měřicích transformátorů proudu a Rogowského cívek.

Cíle práce je možné shrnout do následujících bodů:

- chování MTP při snímání přechodových jevů v elektroenergetických soustavách,
- vyšetření frekvenční závislosti chyb MTP při sinusovém průběhu proudu,
- zjištění závislosti celkové chyby MTP při periodických neharmonických průbězích,
- počítačový návrh konstrukce RC,
- analýza frekvenčních vlastností RC pro snímání impulsních proudů,

- homogenita vinutí RC – možnosti odstínění od rušivých polí,
- vliv diskretizace a numerického zpracování signálu RC,
- návrh a realizace RC pro měření velkých impulsních proudů,
- kalibrace realizované RC – rozměrovou analýzou a elektrickým měřením.

Cílem disertační práce bylo zkoumání vlastností MTP a RC z hlediska použitelnosti při sledování vyšších harmonických složek v měřeném proudu. Pak je možné spolehlivě určit pro jakou oblast frekvencí měřeného proudu je ještě vyhovující nasazení MTP a kde je již potřeba použít ke snímání proudu RC pro nedostatečnou přesnost MTP. Výstupem této práce jsou nejen získané poznatky, ale také RC navržená a zrealizovaná pro měření velkých impulsních proudů v Laboratoři vysokých napětí katedry elektroenergetiky na elektrotechnické fakultě ČVUT v Praze.

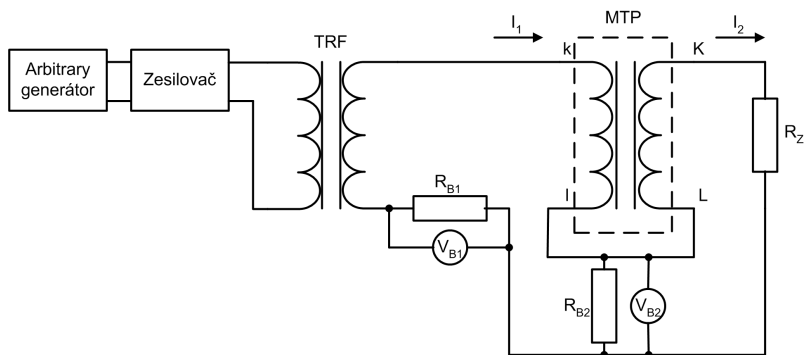
3. METODY ZPRACOVÁNÍ

3.1 VLIV NEHARMONICKÝCH PERIODICKÝCH PRŮBĚHŮ PROUDU NA PŘESNOST MĚŘICÍCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU

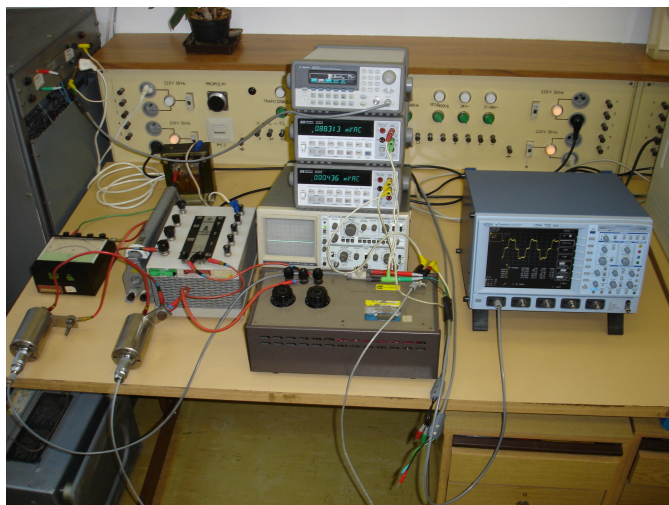
Tato problematika se týká zjištění celkové chyby MTP při jeho použití k měření periodických neharmonických proudů vyskytujících se v elektroenergetických sítích. Zabývat se tímto tématem je podstatné pro možnost určení chyby při snímání proudu odebíraného měniči s výkonovými spínacími prvky, které mohou značně zkreslovat jeho tvar. Součástí této části práce bylo také vyšetření frekvenční závislosti chyb MTP při sinusovém průběhu proudu, což bylo jedním z cílů disertační práce. Podrobnější popis zkoumané problematiky byl uveden ve zprávě [23] a publikován [24], v disertační práci byly vypsány pouze nejdůležitější poznatky.

Celková chyba byla zjišťována u laboratorního MTP typ TL20, výrobce Metra Brno, s třídou přesnosti 0,05 při reálné zátěži 5 VA, v zapojení podle schématu na Obr. 1. Popsaný měřicí obvod byl sestaven na experimentálním měřicím pracovišti, které je uvedeno na Obr. 2. Frekvenční závislost celkové chyby MTP, při měření neharmonických periodických průběhů proudu, úzce souvisí s frekvenční závislostí chyb MTP při harmonických průbězích proudu. Důležitým parametrem je vlastní rezonanční frekvence MTP, daná parazitními kapacitami jeho vinutí a hlavní indukčností. Ve zprávě [23] byla navržena metoda měření celkové chyby pro převod 1:1 a byly zde uvedeny

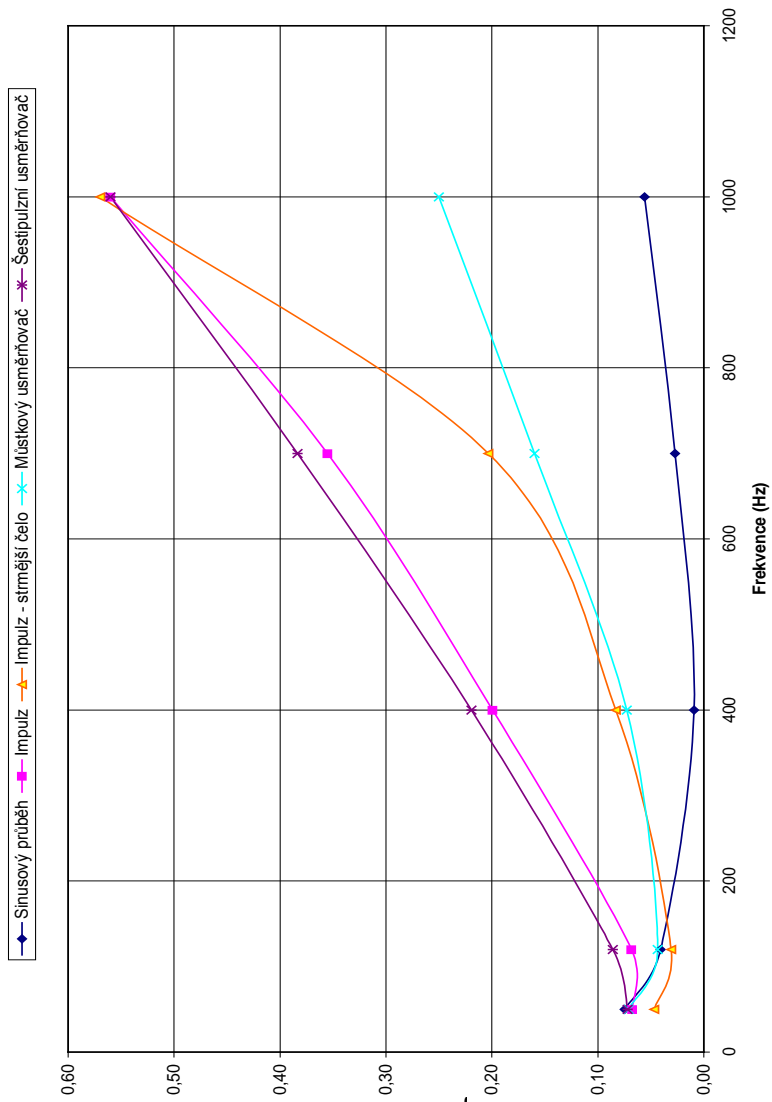
výsledky měření pro typické průběhy proudu přicházející v elektroenergetice v úvahu. Výsledky uvedené na Obr. 3 ukazují, že při těchto průbězích není celková chyba MTP podstatně větší než celková chyba zjištěná při sinusovém průběhu proudu.



Obr. 1. Schéma měřicího obvodu



Obr. 2. Experimentální měřicí pracoviště



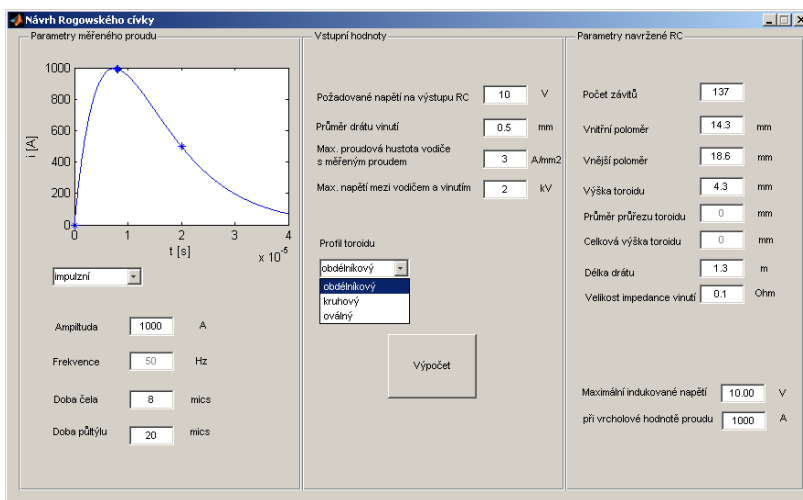
Obr. 3. Průběhy celkové chyby v závislosti na základní frekvenci průběhu primárního proudu pro MTP TL20

3.2 POČÍTAČOVÝ NÁVRH KONSTRUKCE ROGOWSKÉHO CÍVKY

Program pro výpočet parametrů RC byl realizován, podle teoretických vztahů odvozených v disertační práci, v prostředí MatLab[®] 7.1 [27], které obsahuje širokou škálu matematických funkcí, umožňuje rychlé provedení výpočtů a obsahuje programovatelné grafické rozhraní (GUI). Tyto vlastnosti byly využity při tvorbě programu pro návrh RC, který byl popsán také ve zprávě [25] a publikován [26].

Vlastní program sestává ze tří základních částí. V první části je definován průběh měřeného proudu. Pro harmonické průběhy pomocí amplitudy a frekvence, u impulsních průběhů pomocí amplitudy, doby čela a doby pŕltýlu. Zadané průběhy jsou také zobrazeny v grafickém okně. Ve druhé části programu jsou zadávány výchozí parametry pro výpočet a profil průřezu toroidního neferomagnetického jádra. Výpočet je v současné verzi programu možné provádět pro obdélníkový, kruhový a oválný profil. Poslední část programu obsahuje vlastní výpočet a výstupní hodnoty potřebné pro návrh RC včetně odhadu výstupní impedance snímacího vinutí.

Hlavní obrazovka programu pro návrh RC je uvedena na Obr. 4. Po zadání parametrů měřeného impulsního nebo harmonického proudu a zadání potřebných vstupních údajů včetně druhu profilu toroidu RC je po stisknutí tlačítka „Výpočet“ proveden výpočet základních parametrů pro návrh RC, které jsou zobrazeny v pravé části obrazovky.



Obr. 4. Hlavní obrazovka programu pro návrh RC

3.3 NÁVRH REFERENČNÍ ROGOWSKÉHO CÍVKY

Návrh vychází z požadavku měřit pomocí RC impulsní proudy tvaru $8/20 \mu\text{s}$ s amplitudou do 2 kA a byl uveden ve zprávě [28]. Tento požadavek je založen na parametrech vstupních obvodů pro zpracování výstupního napětí RC. Předpokládá se použití vzorkovacích zásuvných karet do PC, které umožňují zpracovat vstupní napětí v rozsahu do 5 V a rozlišení 12 bitů při vzorkovací frekvenci 100 MS/s. Tomu odpovídá amplituda impulsu shora uvedeného průběhu proudu 1 kA. Pro amplitudu proudu do 2 kA lze použít vzorkovací kartu s rozsahem vstupního napětí 10 V a rozlišení 16 bitů při vzorkovací frekvenci 10 MS/s. Návrh předpokládá vzorkování výstupního napětí RC a jeho numerickou integraci.

Další podmínkou pro návrh referenční RC byla dlouhodobá stabilita její konstanty. Jako základní tvar vinutí RC byl zvolen kruhový průřez, u něhož lze předpokládat, že vinutí cívky bude přesně sledovat kruhový tvar kostry. Tím lze dosáhnout optimálního souladu mezi návrhem RC a její realizací. Tento předpoklad není ideálně dodržen například u obdélníkového, resp. čtvercového průřezu, kde na hranách je větší přitlačná síla vinutí na kostru než jinde, takže vinutí nesleduje optimálně tvar nosné kostry. Tím také může být menší dlouhodobá stabilita konstanty RC.

Navržený tvar musí umožnit jednoduchou realizaci elektrostatického stínění pro snížení vlivu rušivých napětí. Tomu vyhovuje čtvercový průřez, na který budou umístěny vodivé neferomagnetické pásy spojené tak, aby netvořily závit nakrátko.

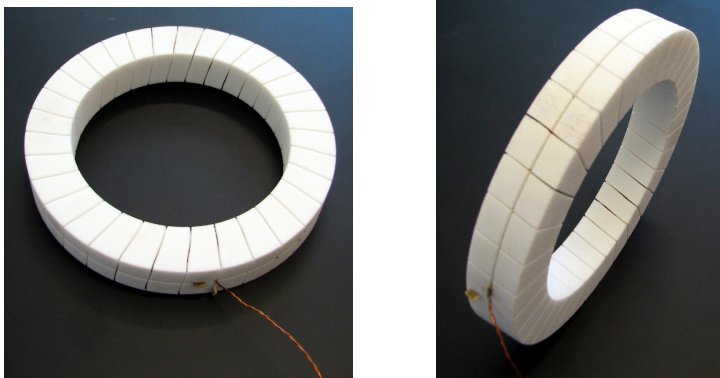
K návrhu RC byl využit počítačový program, který byl popsán v předchozím textu. Vstupními daty tohoto programu byly jednak předpokládané parametry měřeného proudového impulsu, jednak maximální hodnota napětí na vodiči s primárním proudem vzhledem ke společné zemi. Tím je dána podmínka na izolační vzdálenost mezi vodičem s měřeným proudem a vnitřním průměrem toroidu se snímacím vinutím. Po zpracování popsáním programem bylo využito řešení, jehož parametry RC jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1. Rozměry toroidu navrhované RC

Parametry referenční RC - 32z				
toroid pro snímací vinutí	a (mm)	b (mm)	N_2 (-)	M_{21} (μH)
	64,3	80,7	32	0,01871
toroid pro stínící plášť	vnitřní průměr (mm)	vnější průměr (mm)	výška (mm)	
	120	170	25	

Další část návrhu se týkala elektrostatického stínění RC, nezbytného pro snížení rušivých napětí. Jedná se o toroid se čtvercovým průřezem, který rovnoměrně obklopuje snímací vinutí kruhového průřezu. Jeho vzdálenost od snímacího vinutí byla volena tak, aby se minimálně uplatnily parazitní kapacity mezi elektrostatickým stíněním a snímacím vinutím. Rozměry toroidu pro stínící plášť jsou rovněž uvedeny v Tab. 1.

Realizace navržené Rogowského cívky je zaznamenána na Obr. 5.



Obr. 5. Fotografie praktické realizace Rogowského cívky – 32z

4. VÝSLEDKY

V oblasti frekvencí (5 – 20) kHz byl měřený proud snímán bočnickem s modulem impedance $0,00099917 \Omega$ a rozšířenou nejistotou 0,031 % (kalibrační list ČMI, číslo 1031-KL-3061-09). Výsledné hodnoty konstanty RC a její rozšířené nejistoty jsou uvedeny v Tab. 2. Koeficient rozšíření nejistoty je 2. Konstanta realizované RC byla stanovena s nejistotou 0,05 % ve frekvenční oblasti do 20 kHz. Z výsledků je zřejmé, že maximální přesnost se dosáhne při stanovení konstanty RC měřením v širší frekvenční oblasti při použití koaxiálního bočnicku k měření proudu. Pro přesné stanovení průběhu měřeného impulsního proudu je důležitá frekvenční závislost konstanty RC. Ta se s rostoucí frekvencí zvětšuje směrem k rezonanci. Důležité je, aby frekvenční oblast indukovaného napětí ležela v pásmu, kde se minimálně projeví frekvenční závislost konstanty RC. V případě realizované RC byl tento požadavek splněn, což je zřejmé z měření porovnávacími proudové impulsy snímané pomocí koaxiálního bočnicku a realizované RC, viz dokument disertační práce.

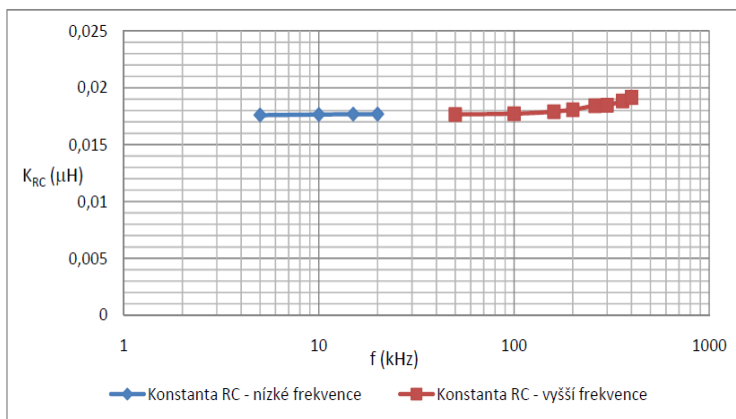
Tab. 2. Závislost konstanty RC a její nejistoty na frekvenci – nízká frekvence

f (kHz)	M_{21} (μH)	$u_{M_{21}}$ (%)
5	0,01759	0,044
10	0,01765	0,046
15	0,01768	0,047
20	0,01768	0,050

Pro ověření vlastností konstanty RC při vyšších frekvencích byl použit jiný vf zesilovač s menším výkonem, než v případě předchozího měření. Z toho důvodu byl zapojen jiný koaxiální bočník s hodnotou odporu 0,2 Ω . Zesilovač je schopen pracovat ve vyšším pásmu frekvencí (50 – 400) kHz. Výsledná závislost konstanty RC na vyšších frekvencích je v Tab. 3. Grafické znázornění výsledné frekvenční závislosti konstanty RC je na Obr. 6.

Tab. 3. Závislost konstanty RC na frekvenci – vyšší frekvence

f (kHz)	M_{21} (μH)
50	0,01765
100	0,01772
160	0,01790
200	0,01806
260	0,01842
300	0,01847
360	0,01883
400	0,01915



Obr. 6. Průběh konstanty RC v závislosti na frekvenci

5. ZÁVĚR

Téma disertační práce bylo nasměřováno do oblasti snímání proudu v elektroenergetice. Úvodní část práce je proto věnována základnímu přehledu snímacích prvků proudu používaných v elektroenergetice. Následující kapitoly jsou zaměřeny na analýzu vybraných snímacích prvků proudu – měřicí transformátory proudu a Rogowského cívky, což umožňuje posouzení jejich vlastností za účelem zvážení jejich nasazení v dané praktické aplikaci.

V rámci tematiky měřících transformátorů proudu bylo analyzováno chování měřících transformátorů proudu při působení přechodných dějů v elektroenergetických soustavách. To zahrnovalo zkoumání vlivu pomalu se měnící stejnosměrné složky proudu při přechodných dějích v obvodech s měřicím transformátorem proudu. V souvislosti s tímto typem přechodného děje byl vytvořen numerický model měřicího transformátoru proudu respektující chování jeho magnetického jádra. Rovněž byla zkoumána chyba měřících transformátorů proudu při napájení neharmonickými periodickými průběhy proudu.

Další část práce byla věnována problematice analýzy Rogowského cívek v oblasti velkých proudů sinusového a impulsního tvaru. V rámci této problematiky byl vyvinut software pro návrh konstrukce Rogowského cívky při zadaných parametrech měřeného vstupního proudu a výstupního napětí cívky.

Dále byly zjišťovány vlastnosti Rogowského cívek v širší frekvenční oblasti, což je důležité z hlediska stanovení jejich použitelné šířky pásma měřeného proudu. To je důležitý údaj například při sledování vyšších harmonických proudů v elektroenergetických soustavách.

Rovněž byly zkoumány metody ověření kvality provedení Rogowského cívek, což zahrnovalo jejich testování pomocí nehomogenního magnetického pole sinusového a impulsního časového průběhu. Byl také prověřen vliv elektrostatického stínění Rogowského cívek na jejich výstupní signál.

Část práce byla věnována číslicové integraci signálu Rogowského cívky při měření impulsního průběhu proudu, jelikož v současné době převažují metody digitálního zpracování signálu.

V poslední části práce byla navržena a realizována Rogowského cívka pro měření velkých impulsních proudů tvaru $8/20 \mu\text{s}$ o amplitudě do 2 kA. Tato cívka je určena především pro měření ve zkušebnictví, které je důležitou součástí elektroenergetiky.

6. LITERATURA POUŽITÁ V TEZÍCH

- [1] Kopeček J., Dvořák M.: Přístrojové transformátory (měřicí a jisticí), nakladatelství Academia, Praha 1966
- [2] Cataliotti, A.; Di Cara, D.; Emanuel, A.E.; Nuccio, S.; , "Current Transformers Effects on the Measurement of Harmonic Active Power in LV and MV Networks," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.26, no.1, pp.360-368, Jan. 2011
- [3] Emanuel, A.E.; Orr, J.A.; , "Current Harmonics Measurement by Means of Current Transformers," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.22, no.3, pp.1318-1325, July 2007
- [4] Garcia, R.; Laiz, H.; , "Characterization of instrument transformers with nonsinusoidal waveforms," *Precision Electromagnetic Measurements, 2002. Conference Digest 2002 Conference on* , vol., no., pp. 234- 235, 2002
- [5] So, E.; , "Harmonic measurements: current and voltage transducers," *Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE* , vol.1, no., pp. 4 vol. 2666, 13-17 July 2003
- [6] Peretto, L.; Sasdelli, R.; Serra, G.; , "Measurement of harmonic losses in transformers supplying nonsinusoidal load currents," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* , vol.49, no.2, pp.315-319, Apr 2000
- [7] Hamrita, T.K.; Heck, B.S.; Meliopoulos, A.P.S.; , "On-line correction of errors introduced by instrument transformers in transmission-level steady-state waveform measurements," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.15, no.4, pp.1116-1120, Oct 2000
- [8] Makky, A.-R.A.M.; Abo-Zied, H.; Abdelbar, F.N.; Mutschler, P.; , "Design of the instrument current transformer for high frequency high power applications," *Power System Conference, 2008. MEPCON 2008. 12th International Middle-East* , vol., no., pp.230-233, 12-15 March 2008
- [9] Yuk-Kei Wong; Yim-Shu Lee; David Ki-Wai Cheng; , "Synthesis of a wide-bandwidth current sensor using a current transformer for active power filter applications," *Power Electronics Specialists Conference, 2000. PESC 00. 2000 IEEE 31st Annual* , vol.1, no., pp.270-273 vol.1, 2000
- [10] Ramboz, J.D.; Destefan, D.E.; Stant, R.S.; , "The verification of Rogowski coil linearity from 200 A to greater than 100 kA using

- ratio methods," Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2002. IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE , vol.1, no., pp. 687- 692 vol.1, 2002
- [11] Djokic, B.; , "Calibration of Rogowski Coils at Power Frequencies Using Digital Sampling," Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on , vol.58, no.4, pp.751-755, April 2009
- [12] Djokic, B.; , "Calibration of Rogowski Coils at Frequencies up to 10 kHz Using Digital Sampling," Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on , vol.59, no.5, pp.1303-1308, May 2010
- [13] Kojovic, L.; , "Rogowski coils suit relay protection and measurement [of power systems]," Computer Applications in Power, IEEE , vol.10, no.3, pp.47-52, Jul 1997
- [14] Kojovic, L.; , "PCB Rogowski coils benefit relay protection," Computer Applications in Power, IEEE , vol.15, no.3, pp.50-53, Jul 2002
- [15] Kojovic, L.A.; , "Comparative Performance Characteristics of Current Transformers and Rogowski Coils used for Protective Relaying Purposes," Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE , vol., no., pp.1-6, 24-28 June 2007
- [16] Kojovic, L.; Bishop, M.T.; Sharma, D.; , "Innovative Differential Protection of Power Transformers Using Low Energy Current Sensors," Industry Applications Society Annual Meeting, 2009. IAS 2009. IEEE , vol., no., pp.1-8, 4-8 Oct. 2009
- [17] Chu Xianghu; Zeng Xiangjun; Deng Feng; Li Ling; , "Novel PCB sensor based on Rogowski coil for transmission lines fault detection," Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE , vol., no., pp.1-4, 26-30 July 2009
- [18] Hewson, C.R.; Ray, W.F.; Davis, R.M.; , "Verification of Rogowski current transducer's ability to measure fast switching transients," Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06. Twenty-First Annual IEEE , vol., no., pp. 7 pp., 19-23 March 2006
- [19] Xueqin Xu; Yanqing Li; Xiangyu Tan; , "Research of monitoring switching-generated arcing current during opening and closing process using Rogowski coil," Condition Monitoring and Diagnosis, 2008. CMD 2008. International Conference on , vol., no., pp.416-419, 21-24 April 2008

- [20] Pretorius, P.H.; Britten, A.C.; Van Coller, J.M.; Reynders, J.P.; , "Experience in measuring disconnecter-generated interference currents in a high voltage substation using Rogowski coils," Communications and Signal Processing, 1998. COMSIG '98. Proceedings of the 1998 South African Symposium on , vol., no., pp.299-304, 7-8 Sep 1998
- [21] Chen Qing; Li Hong-bin; Zhang Ming-ming; Liu Yan-bin; , "Design and characteristics of two Rogowski coils based on printed circuit board," Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on , vol.55, no.3, pp.939-943, June 2006
- [22] Ramboz, J.D.; , "Machinable Rogowski coil, design, and calibration," Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on , vol.45, no.2, pp.511-515, Apr 1996
- [23] Závěrečná zpráva z řešení úkolu „Program rozvoje metrologie 2005“, úkol ÚNMZ č. 35/05 PRM 2005.
- [24] Hlaváček, J. (33 %) - Draxler, K. - Procházka, R.: Current Transformer Usage for Nonharmonic Periodic Currents. In IMEKO - XVIII World Congress and IV Brazilian Congress of Metrology [CD-ROM]. Rio de Janeiro: IMEKO, 2006.
- [25] Dílčí zpráva z řešení úkolu „Program rozvoje metrologie 2007“, úkol ÚNMZ č. VIII/6/07 PRM 2007.
- [26] Hlaváček, J. (25 %) - Procházka, R. - Draxler, K. - Kvasnička, V.: The Rogowski Coil Design Software. In 16th IMEKO TC4 International Symposium [CD-ROM]. Florence: University of Florence, Faculty of Engineering and Faculty of Economics, 2008, p. 295-300. ISBN 978-88-903149-3-3.
- [27] Dokumentace k programu MatLab [online]. 2011 [cit. 2011-02-17]. Dostupný z WWW: <http://www.mathworks.com/>
- [28] Závěrečná zpráva z řešení úkolu „Program rozvoje metrologie 2009“, úkol ÚNMZ č. VIII/6/09 PRM 2009.

7. SEZNAM PRACÍ DISERTANTA

7.1 VZTAHUJÍCÍCH SE K DISERTACI

7.1.1 Stati ve sbornících konferencí

- [1] Hlaváček, J. (25 %) - Procházka, R. - Kvasnička, V. - Draxler, K.: Effect of DC and Transient Current Components on Instrument

- Current Transformer Function. In Proceedings of the 14th International Symposium on New Technologies in Measurement and Instrumentation. Gdynia/Jurata: Gdynia Maritime University, Faculty of Marine Electrical Engineering, 2005, p. 49-53. ISBN 83-89786-37-0.
- [2] Hlaváček J. (25 %) - Procházka R. - Draxler K. - Kvasnička V.: Current Transformer Analysis During Transients. In Sborník z 3. vědeckého sympózia elektroenergetika 2005 [CD-ROM]. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2005, p. 1-7. ISBN 80-8073-305-8.
- [3] Hlaváček J. (50 %) - Procházka R.: Current Transformer Analysis in ATP-EMTP. In European EMTP-ATP Conference Proceedings. Warsaw: Warsaw University of Technology, 2005, p. 100-102. ISBN 0-7803-7968-3.
- [4] Hlaváček, J. (33 %) - Draxler, K. - Procházka, R.: Current Transformer Usage for Nonharmonic Periodic Currents. In IMEKO - XVIII World Congress and IV Brazilian Congress of Metrology [CD-ROM]. Rio de Janeiro: IMEKO, 2006.
- [5] Hlaváček, J. (33 %) - Procházka, R. - Kvasnička, V.: Vyhodnocení celkové chyby MTP při periodickém neharmonickém proudu. In ELEN 2006 (Elektroenergetika) [CD-ROM]. Praha: ČVUT, 2006, s. 1-4. ISBN 80-239-7650-8.
- [6] Hlaváček, J. (33 %) - Procházka, R. - Kvasnička, V.: The Rogowski Coil Analysis in Wider Frequency Range. In IVth International Scientific Symposium ELEKTROENERGETIKA 2007 - Proceedings [CD-ROM]. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2007, p. 319-322. ISBN 978-80-8073-844-0.
- [7] Hlaváček, J. (25 %) - Procházka, R. - Draxler, K. - Kvasnička, V.: The Rogowski Coil Design Software. In 16th IMEKO TC4 International Symposium [CD-ROM]. Florence: University of Florence, Faculty of Engineering and Faculty of Economics, 2008, p. 295-300. ISBN 978-88-903149-3-3.
- [8] Hlaváček, J. (33 %) - Procházka, R. - Kvasnička, V.: Analysis of Discretized Rogowski Coil Signal. In Riadenie v energetike '08. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2008, p. 1-7. ISBN 978-80-227-2883-6.
- [9] Procházka, R. - Hlaváček, J. (25 %) - Kvasnička, V. - Draxler, K.: Rogowski Coil Parameters Verification in Wide Frequency Range. In Proceedings of the 16th International Symposium on High

Voltage Engineering. Cape Town: South Africa Institute of Electrical Engineers (SAIEE), 2009, p. 372. ISBN 978-0-620-44585-6.

7.2 PUBLIKACE OSTATNÍ

7.2.1 Články v časopisech WoS

- [1] Draxler, K. - Styblikova, R. - Hlavacek, J. (25 %) - Prochazka, R.: Calibration of Rogowski Coils with an Integrator at High Currents. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2011, Special Issue CPEM 2010. (přijato: 2/2011, předpokládaný termín vydání: II.Q. 2011)

7.2.2 Stati ve sbornících konferencí

- [2] Hlaváček, J. (50 %) - Kvasnička, V.: Ferorezonance v elektroenergetických soustavách. In Riadenie v energetike `04. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2004, s. 223. ISBN 80-227-2059-3.
- [3] Kvasnička, V. - Hlaváček, J. (50 %): Modelování obvodů při vzniku ferorezonance. In ELEN 2004 [CD-ROM]. Praha: ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2004, ISBN 80-239-3565-8.
- [4] Kvasnička, V. - Procházka, R. - Hlaváček, J. (33 %): Porovnání diagnostických metod pro detekci poruch vinutí výkonových transformátorů. In ELEN 2004 [CD-ROM]. Praha: ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2004, ISBN 80-239-3565-8.
- [5] Procházka R., Kvasnička V., Hlaváček J. (33 %): Transfer Function Measurements Evaluation Process Using Grubbs' Test. In Sborník z 3. vědeckého sympózia elektroenergetika 2005 [CD-ROM]. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2005, p. 100-106. ISBN 80-8073-305-8.
- [6] Procházka, R. - Hlaváček, J. (33 %) - Kvasnička, V.: Design of the evaluation process for transformer winding diagnostics. In 15th International Symposium on High Voltage Engineering - Proceedings [CD-ROM]. Ljubljana: Elektroinštitut Milan Vidmar, 2007, p. 1-5. ISBN 978-961-6688-00-0.
- [7] Procházka, R. - Hlaváček, J. (50 %): Měření redukčního činitele silnoproudých vysokonapěťových kabelů v širším frekvenčním spektru. In Sborník konference ELEN 2008 [CD-ROM]. Praha: ČVUT FEL, Katedra elektroenergetiky, 2008, s. 1-4. ISBN 978-80-254-2293-9.

- [8] Procházka, R. - Hlaváček, J. (50 %): The Impedance Characteristics Usage in High Frequency Transformer Model. In Riadenie v energetike '08. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2008, p. 1-5. ISBN 978-80-227-2883-6.
- [9] Hlaváček, J. (20 %) - Draxler, K. - Styblíková, R. - Procházka, R. - Kvasnička, V.: Testing of HV Dividers in Wider Frequency Range. In Sborník konference ELEN 2010 [CD-ROM]. Prague: CTU, Faculty of Electrical Engineering, Department of Electroenergetics, 2010, p. 1-7. ISBN 978-80-254-8089-2.

7.3 VÝZKUMNÉ ZPRÁVY

- [10] Kvasnička, V. - Kincl, V. - Hlaváček, J. (30 %): Měření kvazistacionárních harmonických. [Výzkumná zpráva]. Praha: ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2003. 030520-01. 12 s.
- [11] Kvasnička, V. - Draxler, K. - Styblíková, R. - Hlaváček, J. (20 %) - Procházka, R. - et al.: Analýza přesnosti měřicích transformátorů proudu při působení přechodných dějů v elektroenergetických soustavách. [Výzkumná zpráva]. Praha: ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2004. 40/04012/13115. 40 s.
- [12] Kvasnička, V. - Hlaváček, J. (20 %) - Procházka, R. - Tomčík, J. - Veselka, T.: Měření harmonických v distribuční síti 22 kV. [Výzkumná zpráva]. Praha: ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2004. 041203-35. 19 s.
- [13] Kvasnička, V. - Draxler, K. - Procházka, R. - Hlaváček, J. (20 %) - Styblíková, R. - et al.: Měření velkých neharmonických a impulsních proudů v elektroenergetice. [Výzkumná zpráva]. Praha: ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2005. 051118-01. 34 s.
- [14] Kvasnička, V. - Draxler, K. - Hlaváček, J. (20 %) - Procházka, R. - Styblíková, R. - et al.: Možnosti náhrady MTP Rogowského cívkou. [Výzkumná zpráva]. Praha: ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2006. 061123-01. 32 s.
- [15] Kvasnička, V. - Draxler, K. - Hlaváček, J. (20 %) - Procházka, R. - Styblíková, R. - et al.: Analýza obvodu pro měření velkých impulsních proudů. [Výzkumná zpráva]. Praha: ČVUT FEL, Katedra elektroenergetiky, 2007. 071108-01. 26 s.

8. OHLASY

Bez ohlasů.

9. SUMMARY

ANALYSIS OF CURRENT SENSORS IN ELECTRICAL POWER ENGINEERING

The doctoral thesis deals with selected current sensors in electrical power systems. There was mentioned overview of essential current sensors used in power grids. The main task was analysis of selected current sensors – instrument current transformers and Rogowski coils.

The first part of the thesis was focused on the analysis of current transformers behaviour, especially in case of slowly changing direct-current component during transients in power systems. The numerical model was designed to simulate the current transformer behaviour during such a transient process. This is useful for numerical simulations of transient processes in electrical power grids. There was also analysed current transformer error in case of periodic non-harmonic current measurements. That is important know-how in todays power systems, where semiconductor converters are used in many applications.

The second part of the thesis was concerned about Rogowski coils, focused on the heavy current impulse measurements. There was analysed the influence of Rogowski coil winding inhomogeneity and the position of the return conductor with measured current. The influence on the measured impulse current was investigated in case of discretization and numerical processing of the Rogowski coil output signal. Problems mentioned above are important in the Rogowski coil design development for applications in power systems and testing departments. The Rogowski coil designed for heavy current impulse measurement was realised. There was also realised calibration based on dimension analysis and electrical measurement for purposes of making the decision on more accurate method of Rogowski coil parameters determination. Knowledge and solutions mentioned in this thesis should be useful parts of the future tasks in electrical power systems.