

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 723

ISSN 1213-4198

thesis IS

Ing. Věra Nováková Zachovalová

**Přesná měření
střídavých proudů**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

Ing. Věra Nováková Zachovalová

PŘESNÁ MĚŘENÍ STŘÍDAVÝCH PROUDŮ

ACCURATE AC CURRENTS MEASUREMENTS

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Kybernetika, automatizace a měření
Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, PhD.
Oponenti: Ing. Peter Vrabček, CSc.
doc. Ing. Karel Draxler, CSc.
Datum obhajoby: 2. prosince 2013

Klíčová slova:

měření elektrického výkonu, měření elektrického proudu, proudový bočník, klecový bočník, model bočníku, metoda Monte Carlo.

Keywords

Power measurement, Current measurement, Current shunt, Cage shunt, Shunt model, Monte Carlo method.

Místo uložení originálu disertační práce:

Ústav automatizace a měřicí techniky

FEKT VUT v Brně

Technická 3082/12

61600 Brno

© Věra Nováková Zachovalová, 2013

ISBN 978-80-214-4862-9

ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD	5
2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	5
2.1 Klecové bočníky	5
2.1.1 Klecové bočníky MIKES	6
2.1.2 Klecové bočníky JV	6
2.1.3 Klecové bočníky SP	8
2.1.4 Klecové bočníky SIQ	9
2.1.5 Klecové bočníky ČMI	9
2.2 Foliové bočníky	10
3 MOTIVACE	12
4 MĚŘÍCÍ METODY	12
4.1 Měření teplotního a výkonového koeficientu bočníků	12
4.1.1 Měření výkonového koeficientu odporu bočníku	13
4.1.2 Měření teplotního koeficientu bočníků	14
4.2 Měření AC-DC difference bočníků	15
4.3 Měření fázové chyby bočníků	17
5 KALIBRACE BOČNÍKŮ ČMI	18
5.1 Kalibrace TCR a PCR bočníků	18
5.2 Kalibrace AC-DC difference bočníků	19
5.3 Kalibrace fázové chyby bočníků	19
6 ANALYTICKÝ MODEL BOČNÍKŮ ČMI	20
6.1 Sestavení analytického modelu bočníku	20
6.2 Výpočet Modelu a jeho nejistot	22
6.3 Verifikace modelu	23
7 OPTIMALIZACE KONSTRUKCE	24
7.1 Citlivostní analýza	24
7.2 Vylepšení konstrukce	25
7.2.1 Optimalizace konstrukce existujících bočníků	25
7.2.2 Zásady konstrukce bočníků nad 10 A	27
8 ZÁVĚR	28
LITERATURA	29
CURRICULUM VITAE	31
ABSTRAKT	32
ABSTRACT	32

1 ÚVOD

V posledních letech se klade velký důraz na ekologii, s čímž souvisí i nutnost šetřit elektrickou energií i produkovat tzv. čistou energii. Místo ovzduší znečišťujících elektráren spalujících uhlí, plyn, olej se staví jaderné elektrárny. Vyrábí se energeticky úsporné spotřebiče, je snaha snížit ztráty vznikající při přenosu z elektráren ke spotřebitelům. Jednotlivé státy se zaměřují na větší dohled nad snižováním spotřeby elektrické energie, na větší efektivitu, větší kvalitu energie. S tím vším souvisí také požadavky na přesnější měření elektrické energie a výkonu, vytvoření nové metrologické infrastruktury.

Měření elektrického proudu je nedílnou součástí měření elektrického výkonu. Rozvoj metrologie elektrické energie a výkonu je tedy nutné podpořit mimo jiné také rozvojem metrologie elektrického proudu.

Z poměrně široké problematiky metrologie střídavého proudu se disertační práce zabývá vývojem vylepšených precizních klecových bočníků pro měření střídavých proudů v rozsahu 10 mA až 100 A, 10 Hz až 100 kHz. Vychází z požadavků národních metrologických institutů (NMI) na snížení dosahovaných nejistot měření, frekvenční rozšíření měřených střídavých proudů, dále na minimální fázovou chybu a chybu v amplitudě.

Výsledky disertační práce budou využity k rozvoji etalonáže stejnosměrných a nízkofrekvenčních elektrických veličin v Českém metrologickém institutu v Brně.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Bočníky se vyrábí v různých provedeních a přesnostech. Kromě běžně komerčně dostupných je snaha NMI vyvinout speciální velmi přesné bočníky s minimální frekvenční závislostí odporu (v řádu maximálně desítek ppm) a fázovou chybou (v řádu stovek μ rad) [1].

Základní princip konstrukce těchto speciálních bočníků vychází z koaxiální konstrukce. V podstatě je lze rozlišit na dva typy a to foliové bočníky („foil shunt“) [11] nebo klecové bočníky („cage shunt“) [2], [5], [6], [7], [8].

2.1 KLECOVÉ BOČNÍKY

Princip konstrukce u klecových bočníků spočívá v paralelním spojení několika precizních rezistorů, čímž se procházející proud rozdělí do více větví. Každým rezistorem protéká relativně malý proud a tím nedochází k tak vysokému ohřevu ve srovnání s bočníkem obsahujícím pouze jeden rezistor. Pro omezení frekvenční závislosti se používají bezindukční rezistory. Pro proudy menší než 10 mA obvykle není třeba dělení do více větví.

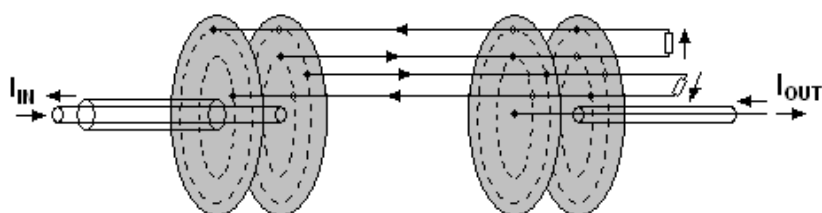
Pro vlastní konstrukci se obvykle využívají jednostranné a oboustranné desky plošných spojů (DPS) a precizní rezistory typu BMF („Bulk Metal Foil“) nebo také SMD rezistory typu MELF („Metal Electrode Face Bonding“).

Dále jsou popsány konstrukce bočníků, ke kterým byl publikován nějaký model, a bočníky ČMI, ke kterým byl vyvinut model v disertační práci.

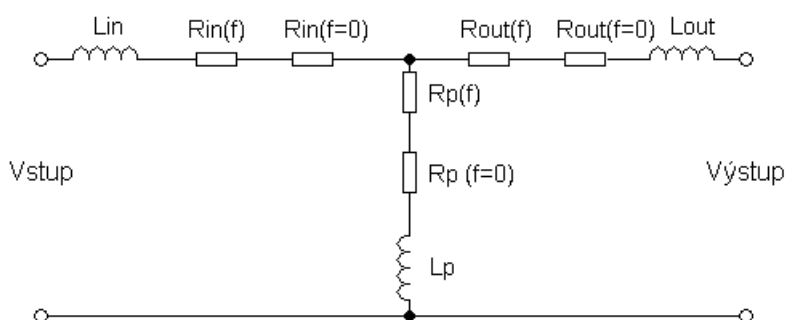
2.1.1 Klecové bočníky MIKES

Ve finském NMI (MIKES) vyvinuli sadu klecovým bočníků pro použití v rozsahu 20 mA až 20 A, 20 Hz – 10 kHz s nominálním výstupním napětím 1 V (jen u 20A bočníku s výstupním napětím 1,5 V) pro použití zejména s planárními termokonvertory $193 \Omega/2 \text{ V}$ nebo DMM [7].

Jsou postaveny ze tří kruhových DPS s paralelně uspořádanými rezistory typu S102K fy. Vishay (max. 100 ks na jeden bočník) tak, že sousedícími rezistory prochází proud opačným směrem pro minimalizaci vlivu magnetického pole a tím indukčnosti. Dvě kruhové DPS slouží k přívodu a odvodu proudu rezistory, třetí je oboustranná DPS, která průměruje napětí vznikající na jednotlivých rezistorech a je spojena s výstupním konektorem (viz obrázek 2.1) [7]. K těmto bočníkům byl zvolen T model uvedený na obrázku 2.2.



Obrázek 2.1 Konstrukce bočníků MIKES s opačným směrem proudu v navzájem sousedních rezistorech [7]



Obrázek 2.2 T model bočníků MIKES [7]

Všechny složky modelu byly počítány z měření přenosové impedance, vstupní impedance při otevřeném výstupu, vstupní impedance při zkratovaném výstupu, měření výstupní impedance při otevřeném vstupu, měření výstupní impedance při zkratovaném vstupu [7].

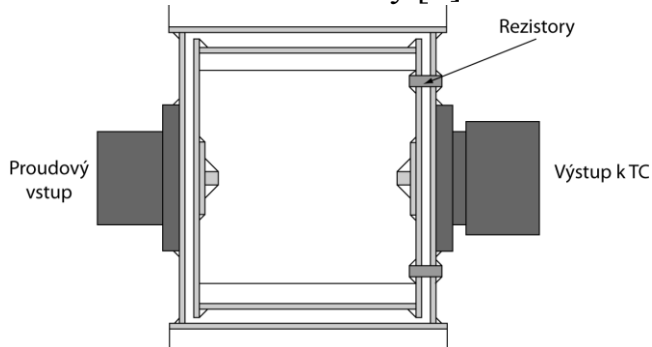
U všech bočníků pak byla zkalibrována jejich AC-DC diference [7], bohužel porovnání naměřených výsledků s výše uvedeným modelem nebylo již publikováno. Stejně tak analýza fázové chyby nebyla publikována.

2.1.2 Klecové bočníky JV

V norském NMI byla vyvinuta sada bočníků pokrývající rozsah 30 mA až 10 A, 10 Hz až 100 kHz pro použití zejména s termokonvertory [6].

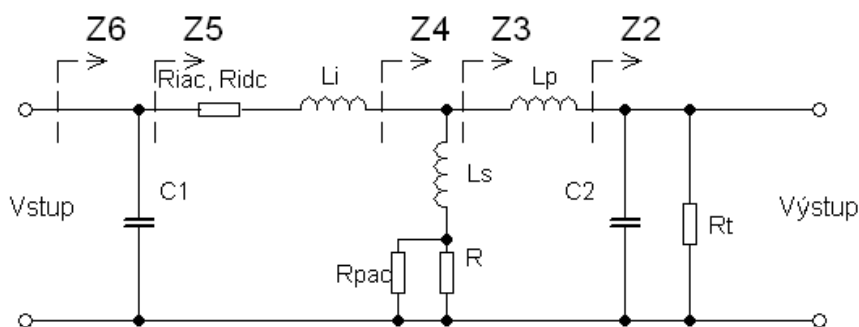
Konstrukce bočníků je naznačena na obrázku 2.3. Byla zvolena symetrická konstrukce tvaru čtverce s SMD rezistory typu MELF osazenými mezi dvěma

oboustrannými deskami a připájenými k Cu vrstvám na obou stranách. Výstupní napětí je pak měřeno ze středu čtverce s rezistory [6].



Obrázek 2.3 Konstrukce bočnicků JV [6]

K bočnickům byl sestaven model zobrazený na obrázku 2.4. R reprezentuje odpor bočnicku, L_s sériovou indukčností rezistoru bočnicku. L_p a C_2 jsou sériová indukčnost a paralelní kapacita výstupní části bočnicku. R_{pac} je paralelní odpor způsobený dielektrickými ztrátami. L_i a C_1 je sériová indukčnost a paralelní kapacita měřená ze vstupní části bočnicku. R_{iac} a R_{idc} reprezentuje odporové ztráty v konstrukci. R_t je pak vstupní odpor termokonvertoru použitý měření výstupního napětí bočnicku [6].



Obrázek 2.4 Model bočnicků JV [6]

AC-DC diference bočnicku je definovaná jako:

$$\delta = \frac{|I_{AC}| - I_{DC}}{I_{DC}}, \quad (2.1)$$

kde I_{DC} je stejnosměrný proud procházející bočnickem a I_{AC} je efektivní hodnota střídavého proudu procházejícího bočnickem, která způsobuje stejné výstupní napětí na termokonvertoru U_{tDC} . Platí [6]:

$$I_{DC} = \frac{U_{tDC}}{\frac{R_t R}{R_t + R}}. \quad (2.2)$$

$$I_{AC} = \frac{Z_3 Z_5}{Z_2 Z_4 Z_6} U_{tDC}, \quad (2.3)$$

kde Z_2 až Z_6 jsou impedance částí modelu dle obrázku 2.4.

Takto spočítaná AC-DC diference byla porovnána s naměřenými hodnotami do 100 kHz (průměr z měření tří bočníků) se shodou lepší než 5 ppm. Model byl dále verifikován nezávislým změřením jednoho 300mA bočníku v SP a dvou celých sad v PTB. Hodnoty pro 300mA bočník byly vypočtené až do 1 MHz, kde se ukázala shoda s měřeními v SP a PTB lepší než 10 ppm [6]. Fázová chyba bočníků analyzovaná modelem ale publikována nebyla.

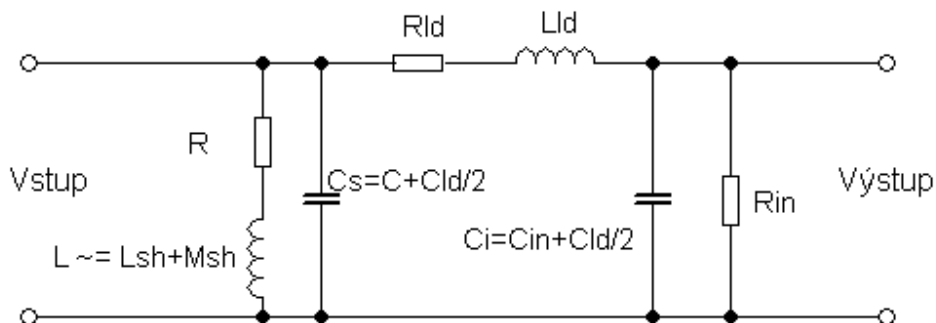
2.1.3 Klecové bočníky SP

Pracovníci švédského NMI (SP) navrhli sadu klecových bočníků pro široké spektrum použití: od měření AC-DC diference, výkonu a impedance až po měření proudových transformátorů [5].

Podobně jako u konstrukce MIKESu byla zvolena symetrická kruhová konstrukce s paralelně spojenými rezistory fy. Vishay typu S102 osazenými na příčkách mezi dvěma DPS deskami, které průměrují napětí na rezistorech a jsou spojeny s výstupním konektorem. Příčky jsou z oboustranné DPS a slouží k přívodu a odvodu měřeného proudu [5].

Model SP bočníku se zátěží je uveden na obrázku 2.5 [4]. Na tomto schématu představuje R odpor, C kapacitu a L indukčnost bočníku. L_{ld} , C_{ld} a R_{ld} představuje indukčnost, kapacitu a odpor přívodních kabelů a C_{in} a R_{in} pak vstupní impedanci zátěže. Celková impedance je pak dána vztahem [4]:

$$Z = R \left(1 - \frac{R+R_{ld}}{R_{in}} \right) + j\omega \left(L - R^2(C_s + C_i) - R \frac{L+L_{ld}}{R_{in}} - RR_{ld}C_i \right). \quad (2.4)$$



Obrázek 2.5 Model bočníků SP [4]

Pokud platí, že R_i že $R_{in} \gg R \gg R_{ld}$, $C_s \gg C_i$, pro celkovou impedanci platí (za předpokladu $\omega C \ll R$, $\omega L \ll R$) [4]:

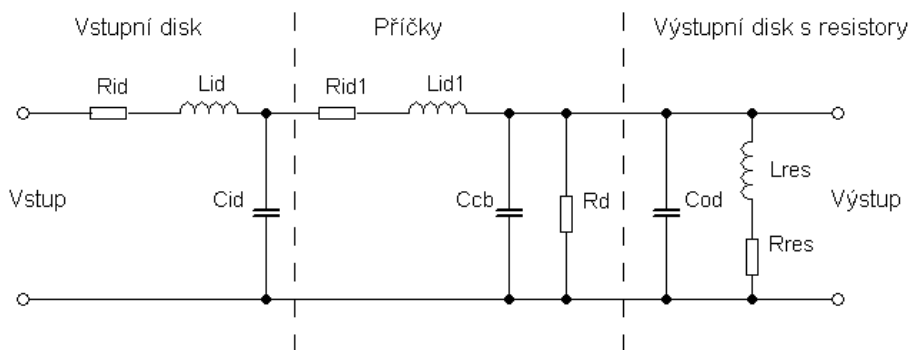
$$Z = R + j\omega(L - R^2C) = R + j\omega L_{eq}. \quad (2.5)$$

Na základě výše provedených úvah pracovníci SP vyvinuli metodu měření fázové chyby bočníků pomocí RLC mostu, kterým měřili ekvivalentní indukčnost bočníků L_{eq} a fázovou chybu pak stanovili jako $\tan^{-1}(\omega L/R)$ [4]. Výpočty AC-DC diference na základě modelování publikovány nebyly.

2.1.4 Klecové bočníky SIQ

Ve slovinském NMI (SIQ) vyvinuli sadu 14 bočníků pokrývajících rozsah od 100 μA až do 20 A s pozdějším rozšířením až do 100 A [8], [9]. Konstrukce je analogická ke konstrukci bočníků SP.

Na rozdíl od pracovníků SP se v SIQ zaměřili na tvorbu modelu těchto bočníků pro výpočet AC-DC difference. Výsledný model je ukázán na obrázku 2.6. Sestává ze tří částí modelujících vstupní disk, příčky a rezistory s výstupním diskem [8].



Obrázek 2.6 Model bočníků SIQ [8]

Přenosová funkce byla spočítána jako [8]:

$$\frac{I_{\text{in}}}{U_{\text{out}}} = \frac{1+j\omega(C_{\text{cb}}+C_{\text{od}})Z_{\text{res}}}{Z_{\text{res}}(1-j\omega C_{\text{id}}Z_1)}, \quad (2.6)$$

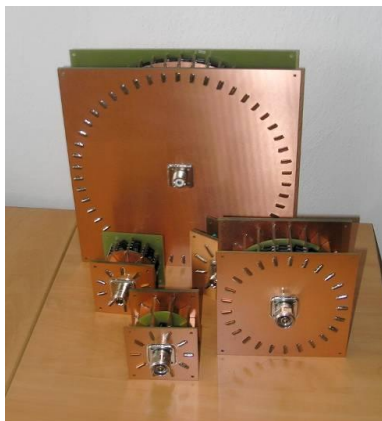
kde Z_1 je impedance příček a výstupní části a Z_{res} impedance vodivosti R_d a rezistorů. R, L, C parametry jednotlivých dílů byly změřeny impedančním analyzátozem anebo kde byla konstrukce dostatečně intuitivní, tak i spočítány. Spočítána byla kapacita vstupního disku, příček i výstupního disku, dále odpor vstupního disku a příček. Všechny indukčnosti uvažované v modulu byly změřeny. Spočítaná AC-DC difference se s naměřenou shodovala do 6 ppm [8]. Fázová chyba bočníků však nebyla analyzována.

2.1.5 Klecové bočníky ČMI

V ČMI byla postavena sada bočníků pokrývajících rozsah od 30 mA až do 10 A. Hlavními kritérii návrhu bylo využití bočníků pro odvození stupnice AC-DC difference proudů s co nejmenším počtem kroků ve frekvenčním rozsahu 10 Hz až 100 kHz [2], [3].

Pro krokování stupnice AC-DC difference proudů se předpokládalo využití planárních termokonvertorů s parametry 10 mA/1 V/90 Ω . Proto by bylo vhodné zvolit jmenovité výstupní napětí bočníků stejné, jako je jmenovité napětí termokonvertorů - tedy 1 V. Dále bylo tedy třeba zajistit neměnnost vlastností bočníků při průchodu jmenovitého a třetinového proudu (tedy zejména závislost změny odporu na teplotě) [3].

Zvolena byla konstrukce analogická ke konstrukci bočníků SP a SIQ (viz obrázek 2.7) s tím rozdílem, že délka příček byla značně redukována, což vedlo ke snížení kapacity bočníků. [2], [3].



Obrázek 2.7 Konstrukce bočníků ČMI [2]

Navržené parametry pro jednotlivé bočníky ukazuje tabulka 2.1. Pro návrh bočniku 30 mA bylo již nutné uvažovat odpor termokonvertoru 90 Ω. Proto byl zvolen odpor bočniku 50 Ω sestávající ze tří 150 Ω rezistorů.

K bočníkům nebyl vytvořen žádný model, pouze byl kalibrován jejich stejnosměrný odpor a AC-DC diference [2].

Tabulka 2.1 Navržené osazení bočníků [2], [3]

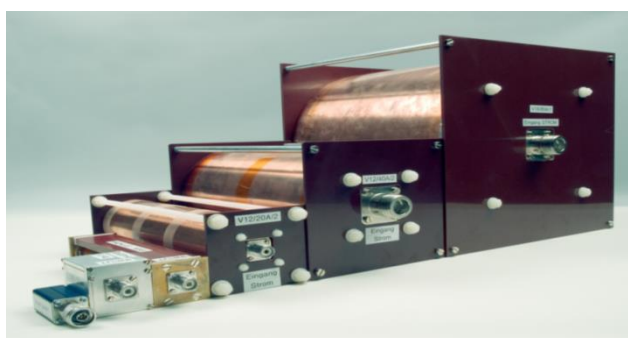
Jmenovitý proud	Jmenovité napětí	Odpor bočniku	Hodnota rezistorů	Typ rezistorů
30 mA	1,5 V, pro PMJTC 1 V	50 Ω, v kombinaci s PMJTC 32 Ω	3 x 150 Ω	3 x Z201
100 mA	1 V, pro PMJTC 0,9 V	10 Ω, v kombinaci s PMJTC 9 Ω	10 x 100 Ω	3 x S102C, 7 x S102K
300 mA	1 V	3,3 Ω	30 x 100 Ω	10 x S102C, 20 x S102K
1 A	1 V	1 Ω	100 x 100 Ω	33 x S102C, 67 x S102K
10 A	1 V	0,1 Ω	100 x 10 Ω	33 x S102C, 67 x S102K

2.2 FOLIOVÉ BOČNÍKY

Pro konstrukci foliových bočníků se používají místo DPS desek či vodičů vodivé folie (obvykle měděné folie) a místo rezistorů odporové folie (obvykle manganinové či zeraninové). Hlavním výrobcem špičkových foliových bočníků koaxiální konstrukce je rakouský NMI (BEV). Bočníky konstruuje v rozsahu od 10 A do 100 A [11]. Prostorové uspořádání těchto bočníků je naznačeno na obrázku 2.8. Modrá a černá barva reprezentuje vodivé folie, duhová pak odporovou [11].

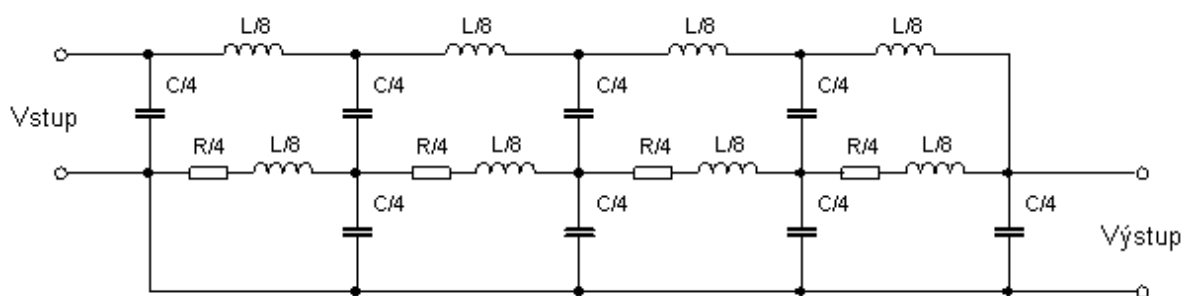


Obrázek 2.8 Proudový foliový bočník [11]

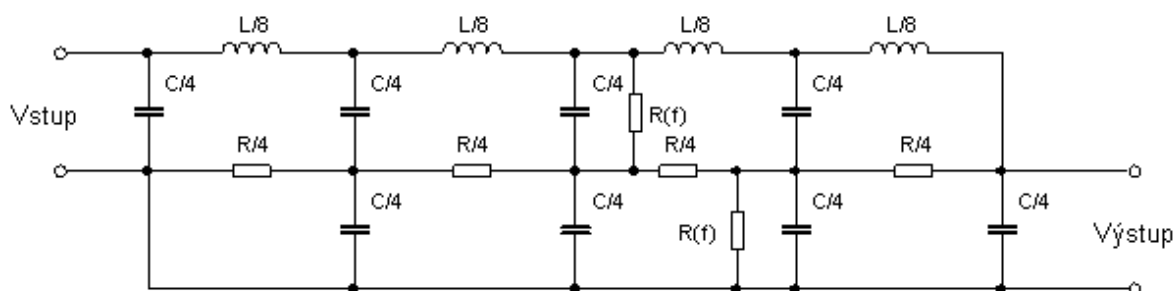


Obrázek 2.9 Konstrukce foliových bočniců BEV [12]

Tvorba modelů k foliovým bočnicům je poměrně náročná. Pracovníci BEV publikovali nejprve model s rozprostřenými parametry uvedený na obrázku 2.10. Shoda vypočtených AC-DC diferencí bočniců podle tohoto modelu s naměřenými však byla na frekvencích vyšších 10 kHz v řádu desítek ppm [11]. Proto tento model dále rozvíjeli a v roce 2007 na setkání expertní skupiny EURAMETu TC-EM SC-LF zveřejnili nový, který je uveden na obrázku 2.11 [13]. Výpočet AC-DC difference bočniců podle tohoto modelu se shoduje s naměřenými hodnotami do 5 ppm. Nicméně pro analýzu fázové chyby se jeví jako nevhodný [13].



Obrázek 2.10 Zjednodušený model foliového bočnicu BEV [11]



Obrázek 2.11 Upravený model foliového bočnicu BEV [13]

3 MOTIVACE

Měření elektrického proudu zažívá velký boom způsobený zejména požadavky na velmi přesné měření výkonu. Dochází jak k rozšiřování proudového i frekvenčního rozsahu (zejména oblast 10 A až 100 A, od výkonových frekvencí až do 100 kHz), tak i zpřesňování měření.

Jádrem měřicího systému pro měření elektrického proudu (potažmo výkonu) je převodník, který převádí měřený proud na normovanou výstupní veličinu, obvykle napětí.

Nejrozšířenějším z těchto převodníků je proudový bočník. V NMI jsou využívány precizní bočníky speciálních konstrukcí, které by měli zajistit měření elektrického proudu s nejistotou v řádu jednotek ppm. Zde chybí dostatečně přesné modely bočníků, které by mohli být využity pro optimalizaci konstrukce jak z hlediska frekvenční závislosti modulu impedance, tak i z hlediska frekvenční závislosti fázové chyby. Již existující více či méně přesné modely se zabývají pouze modulem impedance (potažmo AC-DC diferencí) bočníků.

Disertační práce se tedy zaměřuje na vývoj matematického modelu nejprve k již existujícím klecovým bočníkům ČMI [2], [3]. Současně je nutné zajistit dostatečně přesné metody kalibrace bočníků, které by vedly k verifikaci modelu. Výsledky modelování pak budou použity pro vylepšení konstrukce bočníků.

4 MĚŘÍCÍ METODY

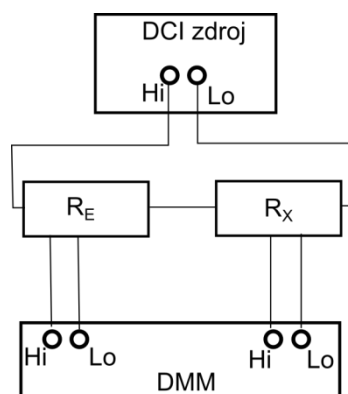
4.1 MĚŘENÍ TEPLOTNÍHO A VÝKONOVÉHO KOEFICIENTU BOČNÍKŮ

V rámci řešení projektu EMRP ([16], [17]) byl sestaven automatický měřicí systém pro měření DCR, který je založen na měření poměru R_U výstupních napětí kalibrovaného a referenčního etalonu. Odpor R_X kalibrovaného etalonu je spočítán podle vztahu:

$$R_X = R_U R_E, \quad (4.1)$$

kde R_E je odpor referenčního etalonu [14], [15].

Kalibrovaný etalon (bočník) a referenční etalon jsou spojeny do série a k DC zdroji dle obrázku 4.1, přičemž nezáleží, který z nich je umístěn na vyšším a který na nižším potenciálu. Výstupní napětí etalonům odečítáno pomocí dvoukanalového multimetru, který také ihned dokáže spočítat jejich poměr R_U a ten pak předá počítači. Měření probíhá tak, že nejprve se čeká na stabilizaci výstupních napětí etalonů a poté je střídavě pro kladnou a zápornou polaritu DC proudu prováděny odečty poměrů napětí R_{U+} a R_{U-} , jejichž průměr pak dává uvažovaný poměr výstupních napětí etalonů R_U . Při měření je získáváno celkem deset hodnot R_U [14], [15].



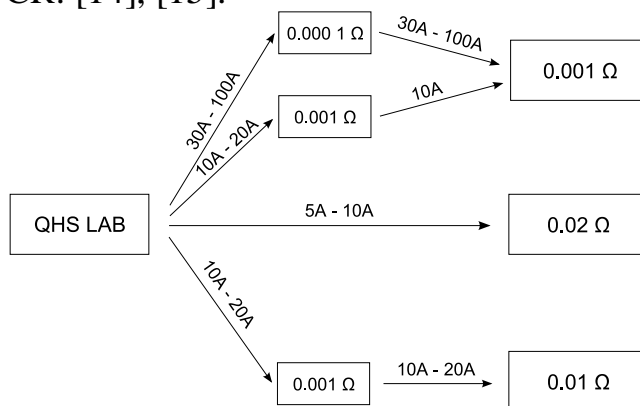
Obrázek 4.1 Blokové schéma zapojení pro měření DCR

Výpočet nejistot měření DCR vychází z rovnice (4.1). Kombinovaná nejistota měření odporu bočnicku může být spočítána jako:

$$u^2(\delta R_X) = c_{R_U}^2 u^2(\delta R_U) + c_E^2 u^2(\delta R_E) + c_{r_c}^2 u^2(\delta r_c) + c_{Ed}^2 u^2(\delta R_{Ed}) + c_{Et}^2 u^2(\delta R_{Et}) + c_{Xt}^2 u^2(\delta R_{Xt}), \quad (4.2)$$

kde $u^2(\delta R_U)$ je příspěvek naměřeného poměru napětí (směrodatná odchylka), $u^2(\delta R_E)$ je příspěvek kalibrace použitého etalonu, $u^2(\delta r_c)$ je příspěvek stability DMM a nedostatečné kompenzace termoelektrických napětí, $u^2(\delta R_{Ed})$ vliv změny hodnoty odporu etalonu od poslední kalibrace, $u^2(\delta R_{Et})$ a $u^2(\delta R_{Xt})$ je vliv změny hodnoty odporu etalonu a kalibrovaného bočnicku s teplotou, c_{R_U} , c_E , c_{r_c} , c_{Ed} , c_{Et} , c_{Xt} jsou příslušné citlivostní koeficienty [14], [15].

Jádrem pracoviště jsou tři olejové pracovní etalony, které byly verifikovány v širším proudovém rozsahu pomocí sady primárních etalonů kalibrovaných v QHS laboratoři (viz schéma návaznosti na obrázku 4.2). Pomocí sady pracovních etalonů pak lze měřit DCR bočnicku při různé teplotě okolí či různém měřícím proudu a tak stanovit jeho TCR a PCR. [14], [15].



Obrázek 4.2 Schéma návaznosti kalibrace pracovních etalonů DCR

4.1.1 Měření výkonového koeficientu odporu bočnicku

Výkonový koeficient odporu bočnicku PCR_{sh} je dán změnou odporu ΔR se změnou procházejícího proudu (a tedy výkonu) ΔP a počítá se podle:

$$PCR_{sh} = \frac{\Delta R}{\Delta P}. \quad (4.3)$$

Měření PCR tak spočívá v měření DCR bočnicku při nejméně dvou různých měřicích proudech odpovídajících změně výkonu ΔP . Pracoviště pro měření PCR tedy sestává ze sady referenčních etalonů umístěných v olejové lázni se stabilitou teploty $\pm 0,02$ °C (složka nejistoty $u^2(\delta R_{Et})$), kalibrovaného bočnicku umístěného na vzduchu v klimatizované místnosti se stabilitou teploty $\pm 0,5$ °C (složka nejistoty $u^2(\delta R_{Xt})$) a proudového zdroje, dostatečně stabilního a generujícího proudy v dostatečném rozsahu. Pro tyto účely se nejlépe hodí kombinace DC kalibrátoru s transkonduktančním zesilovačem Clarke&Hess 8100 [14], [15].

Kombinovaná nejistota měření PCR je pak dána vztahem:

$$u^2(\delta PCR_{sh}) = c_{\Delta R}^2 (u^2(\delta R_1) + u^2(\delta R_2)) + c_{\Delta P}^2 (u^2(\delta P_1) + u^2(\delta P_2)), \quad (4.4)$$

kde $c_{\Delta R}$, $c_{\Delta P}$ jsou citlivostní koeficienty. Příspěvky $u^2(\delta R_1)$ a $u^2(\delta R_2)$ vycházejí z rovnice (4.2).

Protože $P_i = R_i I_i^2$ ($i=1,2$), je příspěvek $u^2(\delta P_i)$ počítán jako:

$$u^2(\delta P_i) = c_{R_i}^2 u^2(\delta R_i) + 2c_{I_i}^2 u^2(\delta I_i), \quad (4.5)$$

kde c_{R_i} , c_{I_i} jsou citlivostní koeficienty. Příspěvek $u^2(\delta I_i)$ může být spočítán ze specifikací použitého proudového zdroje (nebo z jeho kalibračního listu) [14], [14].

4.1.2 Měření teplotního koeficientu bočníků

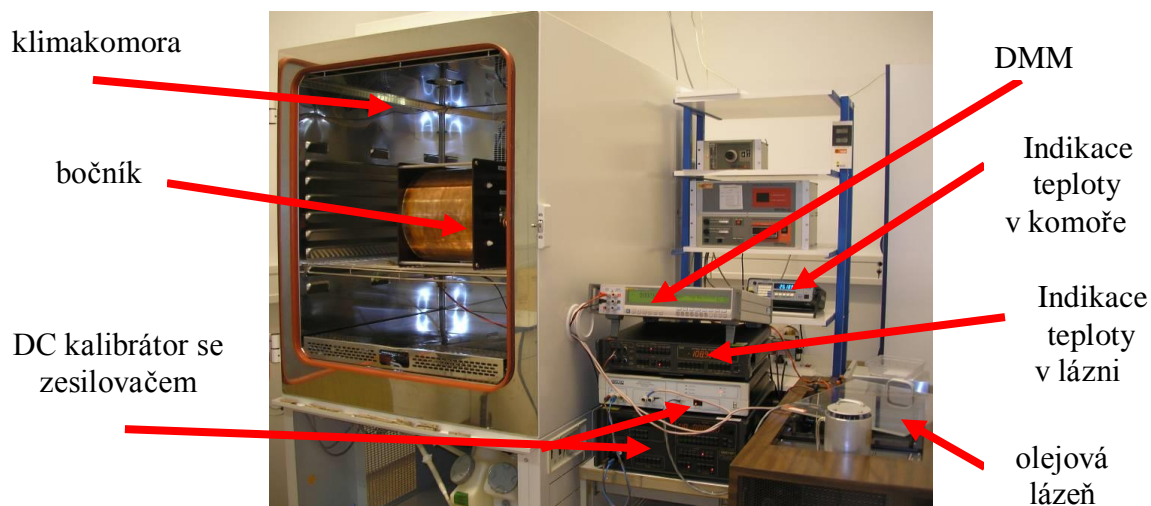
Teplotní koeficient odporu bočnicku TCR_{sh} se počítá dle vztahu:

$$TCR_{sh} = \frac{\Delta R}{\Delta T}, \quad (4.6)$$

kde ΔR změna odporu při změně teploty o ΔT [14], [15].

Měření TCR tedy spočívá v měření DCR bočnicku při nejméně dvou různých teplotách okolí odpovídajících změně teploty o ΔT .

Na obrázku 4.3 je znázorněno pracoviště pro měření TCR_{sh} bočníků. Vlevo je vzduchová klimakomora s teplotní stabilitou 0,15 °C, ve které je umístěn bočník. Referenční etalon je v olejové lázni (na obrázku vpravo dole) se stabilitou teploty $\pm 0,02$ °C. Uprostřed je pak DMM měřící poměr výstupních napětí, kalibrátoru s transkonduktančním zesilovačem a dva voltmetry indikující teploty v klimakomoře a lázni kontrolované pomocí odporových čidel [14], [15].



Obrázek 4.3 Pracoviště pro měření TCR

Kombinovaná nejistota měření se počítá jako:

$$u^2(\delta TCR_{sh}) = c_{\Delta R}^2 (u^2(\delta R_1) + u^2(\delta R_2)) + c_{\Delta T}^2 (u^2(\delta T_1) + u^2(\delta T_2)) \quad (4.7)$$

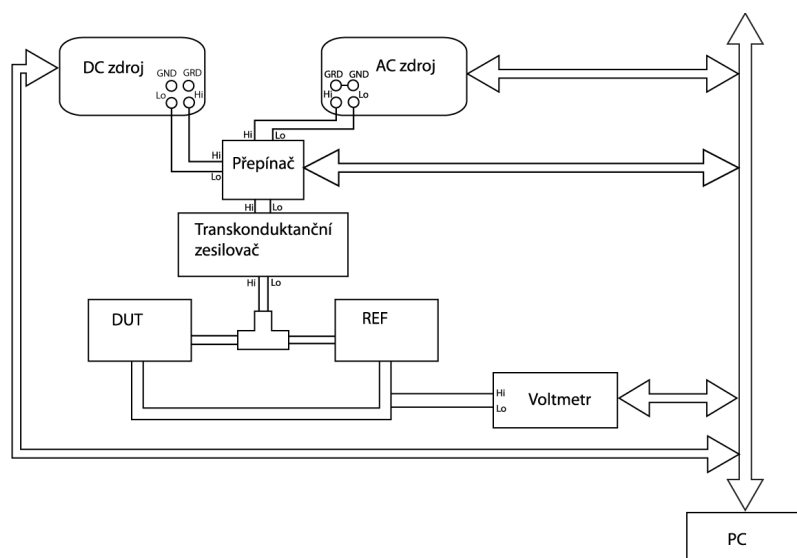
kde $c_{\Delta R}$, $c_{\Delta T}$ jsou citlivostní koeficienty. Příspěvky $u^2(\delta R_1)$ a $u^2(\delta R_2)$ vycházejí z rovnice (4.2) a příspěvky $u^2(\delta T_1)$ a $u^2(\delta T_2)$ mohou být spočítány ze specifikací použitého termostatického boxu (nebo kalibračních listů etalonů PT100, pokud jsou použity pro měření teplotního pole v boxu) [14], [15].

4.2 MĚŘENÍ AC-DC DIFERENCE BOČNÍKŮ

Pro měření AC-DC difference bočníků lze využít pracoviště pro odvozování stupnice AC-DC difference proudů, které bylo vybudováno řešením úkolu technického rozvoje (TR) č. 860111 [19] a TR č. 960111 [20] (součást Programu rozvoje metrologie), (publikováno v [2], [18]).

Na Obrázek 4.4 je uvedeno blokové schéma zapojení měřicího systému pro AC-DC diferenci proudů mezi referenčním a kalibrovaným etalonem. Oba etalony jsou spojeny do série a AC a DC proudy jsou přiváděny přes transkonduktanční zesilovač, který je střídavě připojován přes automatický přepínač ke zdrojům AC a DC napětí. Na rozdíl od měření AC-DC difference napětí se centrální zemnicí bod umísťuje na transkonduktanční zesilovač, nikoli na zdroj střídavého napětí. Systém měří přímo rozdíl AC-DC diferencí kalibrovaného a referenčního etalonu [2], [18], [19], [20].

Referenční i kalibrovaný etalon sestává z bočníku a na jeho výstupu připojeného PMJTC. Bočník, jehož AC-DC diferenci chceme zjistit, se umísťuje do sestavy kalibrovaného etalonu a na výstupu má zátěž tvořenou PMJTC. Naměřené AC-DC difference takto sestaveného kalibrovaného etalonu lze pak interpretovat jako AC-DC difference kalibrovaného bočníku zatíženého PMJTC [19].



Obrázek 4.4 Blokové schéma automatického měřicího systému pro AC-DC diferenci proudů

Základními složkami nejistoty měření vždy budou příspěvek kalibrace referenčního etalonu a příspěvek (směrodatná odchylka) naměřeného rozdílu diferencí referenčního a kalibrovaného etalonu. Měření AC-DC difference probíhá v poměrně složitém měřicím systému, a proto je zde mnoho dalších zdrojů nejistot. Většina z nich je vzhledem k výše zmíněným základním složkám nejistoty nevýznamná. Významnými složkami nejistot zůstávají [2], [18], [19], [20]:

- příspěvek od měřicí sestavy,
- příspěvek závislosti na proudové úrovni referenčního etalonu,
- příspěvek frekvenční závislosti,
- příspěvek teplotní závislosti,
- příspěvek vlivu zapojení.

Vzhledem ke skutečnosti, že jednotlivé příspěvky jsou nekorelované, lze celkový příspěvek k nejistotě (standardní nejistotu) vyjádřit jako odmocninu ze součtu druhých mocnin jednotlivých příspěvků. Zjednodušený vztah výpočet kombinované nejistoty měření je tedy dán následující rovnicí:

$$u^2(\delta_{dut}) = c_{ref}^2 u^2(\delta_{ref}) + c_{meas}^2 u^2(\delta_{meas}) + c_{set up}^2 u^2(\delta_{set up}) + c_{level}^2 u^2(\delta_{level}) + c_{conn}^2 u^2(\delta_{conn}) + c_{fr}^2 u^2(\delta_{fr}) + c_{tem}^2 u^2(\delta_{tem}) \quad (4.8)$$

kde $u^2(\delta_{ref})$ je příspěvek od etalonu (PMJTC), $u^2(\delta_{meas})$ je příspěvek od naměřené difference 792A (směrodatná odchylka), $u^2(\delta_{set up})$ je příspěvek od měřicí sestavy, $u^2(\delta_{level})$ je příspěvek závislosti na napěťové úrovni, $u^2(\delta_{conn})$ představuje vliv zapojení, $u^2(\delta_{fr})$ je příspěvek frekvenční závislosti, $u^2(\delta_{tem})$ je příspěvek teplotní závislosti, c_{ref} , c_{meas} , $c_{set up}$, c_{level} , c_{conn} , c_{fr} , c_{tem} jsou příslušné citlivostní koeficienty [2], [18], [19], [20].

4.3 MĚŘENÍ FÁZOVÉ CHYBY BOČNÍKŮ

Pro měření fázové chyby bočníků existují dvě základní metody a to:

- převedení měření fázové chyby na měření indukčnosti a porovnání etalonu a bočníku pomocí RLC mostu [4],
- měření fázového rozdílu výstupních napětí etalonu a bočníku [21], [22].

Nicméně dostupnost vhodného etalonu, ať už pro použití první nebo druhé metody, se však ukázala jako zásadní problém při případné realizaci této metody na pracovišti v ČMI.

Proto byla v rámci projektu iMERA-EMRP: Power and Energy [17] zajištěna spolupráce s INRIM, kde bylo pro měření chyby fáze vybudováno pracoviště využívající synchronizovaného vzorkování výstupního napětí kalibrovaného bočníku a etalonu se známou fází zapojených do série k proudovému zdroji. K tomu byla využita dvoukanálová vzorkovací karta, jejíž vstupy byly od etalonu a bočníků odděleny pomocí aktivně stíněných transformátorů („Active guarded transformers“, AGT). Celý systém pak byl souhrnně označen jako fázový komparátor [21].

Jako etalon fáze sloužil foliový bočník BEV bočník, jehož fázová chyba byla stanovena v INRIMu odvozením od sady speciálních bočníků 0,5 A až 2 A identické konstrukce s předpokladem, že pro každou dvojici těchto bočníků, může být stanovena absolutní hodnota fázové chyby z relativních, zohledňujících jejich časové konstanty úměrné převrácené hodnotě jejich odporu. Rozdíly časových konstant referenčních bočníků jsou stanoveny měřením (relativní fázová chyba), jejich poměr pak z odporu bočníků a za použití několika referenčních bočníků lze extrapolovat absolutní fázovou chybu [23].

Měření fázové chyby bočníků pak probíhá opět krokovaním od etalonového foliového bočníku nahoru do 100 A, přičemž jsou vždy provedena dvě měření, kdy po prvním měření jsou vyměněny pozice bočníků (ten, který byl na nižším potenciálu je připojen na vyšší a naopak) [23].

Fázová chyba kalibrovaného bočníku φ_{sh} se pak spočítá jako:

$$\varphi_{sh} = \Delta\varphi + \varphi_e = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{2} + \varphi_e, \quad (4.9)$$

kde φ_e je fázová chyba použitého etalonu (či etalonového bočníku) a $\Delta\varphi$ je rozdíl fáze mezi a kalibrovaným bočníkem a etalonem spočítaný jako průměr naměřených fázových rozdílů Φ_1 a Φ_2 ze sady dvou měření s výměnou pozic bočníků. Provedení dvou měření s výměnou pozic bočníků také umožňuje eliminovat fázový rozdíl mezi vstupními kanály vzorkovací karty. [23].

Nejistota měření byla stanovována následovně. Nejistota typu B $u^2(\delta_{set up})$ byla odvozena na základě testování fázového komparátoru [21]. Nejistota T konektoru byla na základě testovacích měření shledána jako nevýznamná. Ze zpracování naměřených (navzorkovaných) sad dat pak byly odvozovány nejistoty typu A, které lze souhrnně označit jako $u^2(\Delta\varphi)$ [23].

Zjednodušený vztah výpočet kombinované nejistoty měření je tedy dán následující rovnicí:

$$u^2(\varphi_{sh}) = c_{\Delta\varphi}^2 u^2(\Delta\varphi) + c_{\varphi_e}^2 u^2(\varphi_e) + c_{set\ up}^2 u^2(\delta_{set\ up}) + c_{level}^2 u^2 \quad (4.10)$$

kde $u^2(\varphi_e)$ je příspěvek použitého etalonu, $u^2(\varphi_{level})$ je příspěvek krokování a $c_{\Delta\varphi}$, c_{φ_e} , $c_{set\ up}$ a c_{level} jsou příslušné citlivostní koeficienty.

5 KALIBRACE BOČNÍKŮ ČMI

Pomocí výše popsaných měřících metod TCR, PCR, AC-DC difference a fázové chyby byla kalibrována existující sada bočníků ČMI 30 mA až 10 A. Vzhledem k tomu, že některá měření probíhala v rámci spolupráce s jinými metrologickými instituty, nebylo možné vždy kalibrovat celou sadu bočníků. Nicméně bylo zajištěno, aby vždy alespoň jeden bočník byl na daný parametr zkalibrován.

Kalibrační data pak budou sloužit k ověření správnosti modelu vyvinutého pro jejich konstrukci a popsaného v kapitole 6.

5.1 KALIBRACE TCR A PCR BOČNÍKŮ

Vhledem k nutnosti pronájmu strojového času klimakomory, bylo měření teplotního koeficientu omezeno jen na bočníky zahrnuté do projektu iMERA-EMRP: Power and Energy a ze sady ČMI bočníků byl tak charakterizován pouze 10 A bočník. Měření probíhalo na 1/10 nominální hodnoty proudu tak, aby bylo minimalizováno ohřívání bočniku procházejícím proudem. Bočník byl umístěn ve vzduchovém termostatu (klimakomoře), kde se postupně měnila teplota od 18 °C do 28 °C při stálé relativní vlhkosti 50 %. Teplotní koeficient TCR byl pak spočítán z hodnot DCR naměřených při 18 °C a 28 °C dle rovnice (4.6).

Dále byl změřen DCR bočníků při 30 % a 100 % nominální hodnoty, DCR 10 A bočniku pak při 50 % až 100 % nominální hodnoty, tedy v takovém rozsahu, jak se předpokládalo jejich použití při krokování stupnice AC-DC difference proudů [19]. Výkonový koeficient PCR byl pak spočítán z hodnot DCR dle rovnice (4.3).

V tabulce 5.1 jsou uvedeny naměřené hodnoty TCR a PCR bočníků včetně rozšířených nejistot měření pro normální rozdělení.

Tabulka 5.1 Naměřené hodnoty TCR a PCR bočníků s nejistotami měření pro $k = 2$

Bočník	TCR (ppm/K)	Nejistota (ppm/K)	PCR (ppm/W)	Nejistota (ppm/W)
30 mA	-	-	-8,50	0,44
100 mA	-	-	-82,42	0,96
300 mA	-	-	1,82	0,99
1 A	-	-	-1,43	0,96
10 A	-1,60	0,33	-2,6	1,9

5.2 KALIBRACE AC-DC DIFERENCE BOČNÍKŮ

Pomocí sestavy pro odvozování stupnice AC-DC difference proudů byla provedena kalibrace AC-DC difference odporu sady bočníků ČMI 0,03 A až 10 A, 10 Hz až 100 kHz, kdy AC-DC difference proudu procházejícího bočníkem byl měřena příslušným etalonem stupnice AC-DC difference proudů (tvořeného PMJTC s jiným bočníkem) a kalibrovaný bočník byl zatížen PMJTC 90 Ω . V následující tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty pro vybrané kmitočty včetně rozšířených nejistot měření pro $k = 2$ a normální rozdělení.

Tabulka 5.2 Naměřené hodnoty AC-DC difference bočníků včetně nejistot měření pro $k = 2$

Bočník- proud		Frekvence (kHz)						
		0,5	1	5	10	20	50	100
30 mA	AC-DC (ppm)	0	0	4	8	20	57	131
	Nejistota (ppm)	6	6	7	8	8	11	15
100 mA	AC-DC (ppm)	1	-1	2	4	9	19	34
	Nejistota (ppm)	9	9	9	9	10	12	22
300 mA	AC-DC (ppm)	0	0	3	4	7	12	16
	Nejistota (ppm)	11	11	12	13	15	18	27
1 A	AC-DC (ppm)	0	-1	0	0	2	5	6
	Nejistota (ppm)	13	13	13	13	14	17	31
10 A	AC-DC (ppm)	1	1	0	-1	-3	-5	-13
	Nejistota (ppm)	17	17	17	17	19	22	39

5.3 KALIBRACE FÁZOVÉ CHYBY BOČNÍKŮ

V rámci spolupráce s italským metrologickým institutem INRIM v projektu iMERA-EMRP: Power and Energy bylo provedeno porovnání fázových chyb bočníků od 10 A do 100 A. Do těchto měření byl začleněn také 10A klecový bočník ČMI.

V následující tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty fázové chyby 10A bočníku pro vybrané kmitočty včetně rozšířených nejistot měření pro normální rozdělení.

Tabulka 5.3 Naměřené hodnoty fázové chyby 10A bočníku, nejistoty měření pro $k = 2$

Bočník- proud		Frekvence (kHz)						
		0,5	1	5	10	20	50	100
10 A	Fázová chyba (μ rad)	12	15	62	129	253	615	1065
	Nejistota (μ rad)	29	15	29	57	119	286	546

6 ANALYTICKÝ MODEL BOČNÍKŮ ČMI

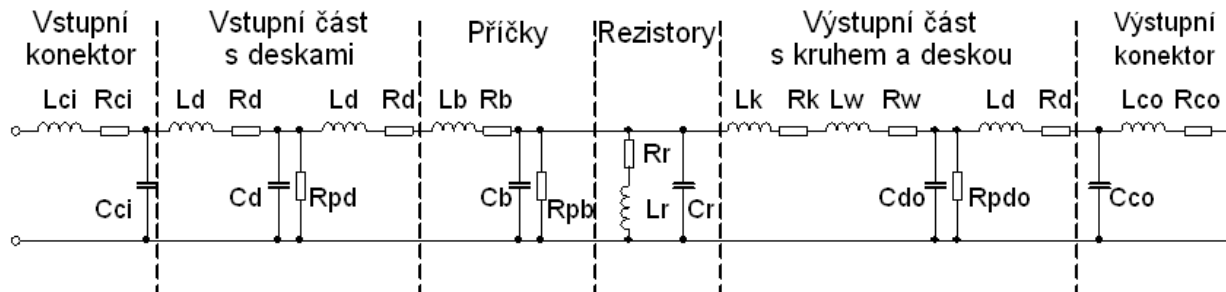
Při sestavování analytického (RLC) modelu bylo zvoleno kaskádní zapojení pasivních dvojbranů reprezentujících jednotlivé konstrukční části klecového bočnicku. K těmto dvojbranům lze sestavit kaskádní matice, jejichž součin pak určuje kaskádní matici celého modelu. Z celkové kaskádní matice modelu pak lze určit jeho přenosovou impedanci [24].

6.1 SESTAVENÍ ANALYTICKÉHO MODELU BOČNÍKU

Poměrně komplikovanou konstrukci je pro modelování vhodné rozdělit na jednotlivé konstrukční díly, což zjednoduší vývoj modelu. Proto byl bočník rozdělen na tyto základní konstrukční části [24]:

- vstupní konektor,
- vstupní část tvořená dvěma jednostrannými DPS,
- příčky z dvoustranné DPS,
- rezistory,
- výstupní část tvořená kruhem a deskou z jednostranné DPS a hliníkovým drátkem,
- výstupní konektor.

Pokud se dvojbrany jednotlivých konstrukčních částí spojí kaskádně za sebe, vznikne model celého bočnicku dle obrázku 6.1 [24].



Obrázek 6.1 Model bočnicku

Kaskádní matice modelu bočnicku je pak dána součinem kaskádních matic jednotlivých konstrukčních dílů [24]:

$$\hat{A}_S = \hat{A}_{CI} \hat{A}_I \hat{A}_B \hat{A}_R \hat{A}_O \hat{A}_{CO}, \quad (6.1)$$

kde

$$\hat{A}_{CI} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{R_{CI} + j\omega L_{CI}}{j\omega C_{CI}} & R_{CI} + j\omega L_{CI} \\ \frac{1}{j\omega C_{CI}} & 1 \end{bmatrix}, \quad (6.2)$$

$$\hat{A}_I = \begin{bmatrix} 1 + \frac{R_d + j\omega L_d}{R_{pd} \frac{1}{j\omega C_d}} & 2(R_d + j\omega L_d) + \frac{(R_d + j\omega L_d)^2}{R_{pd} \frac{1}{j\omega C_d}} \\ \frac{1}{R_{pd} \frac{1}{j\omega C_d}} & 1 + \frac{R_d + j\omega L_d}{R_{pd} \frac{1}{j\omega C_d}} \end{bmatrix}, \quad (6.3)$$

$$\hat{A}_B = \begin{bmatrix} 1 + \frac{R_B + j\omega L_B}{R_{pB} \frac{1}{j\omega C_B}} & R_B + j\omega L_B \\ \frac{1}{R_{pB} \frac{1}{j\omega C_B}} & 1 \end{bmatrix}, \quad (6.4)$$

$$\hat{A}_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{(R_r + j\omega L_r) \frac{1}{j\omega C_r}} & 1 \end{bmatrix}, \quad (6.5)$$

$$\hat{A}_O = \begin{bmatrix} 1 + \frac{R_k + R_w + j\omega(L_k + L_w)}{R_{pdo} \frac{1}{j\omega C_{do}}} & R_k + R_w + j\omega(L_k + L_w) \\ \frac{1}{R_{pdo} \frac{1}{j\omega C_{do}}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_d + j\omega L_d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6.6)$$

$$\hat{A}_{CO} = \begin{bmatrix} 1 & R_{CO} + j\omega L_{CO} \\ \frac{1}{j\omega C_{CO}} & 1 + \frac{R_{CO} + j\omega L_{CO}}{j\omega C_{CO}} \end{bmatrix}. \quad (6.7)$$

Odpor, kapacita a indukčnost jednotlivých konstrukčních dílů byly spočítány z geometrických rozměrů a materiálových vlastností DPS vyjma rezistorů, jejichž odpor, kapacita a indukčnost byly změřeny [24].

Během měření bývá výstup bočnicku zatížen vstupní impedancí použitého voltmetru, kterým může být klasický multimetr, ale také termokonvertor, vzorkovací karta atp., jejichž vstupní impedance se liší a tím pádem může být různá i AC-DC diference a fázová chyba bočnicku pro jednotlivé zátěže. Proto je nezbytné v modelu uvažovat také tuto zátěž, kterou reprezentuje kaskádní matice \hat{A}_L . Výsledná kaskádní matice modelu se zátěží pak je [24]:

$$\hat{A} = \hat{A}_S \hat{A}_L. \quad (6.8)$$

Přenosová impedance modelu je dána [25]:

$$\hat{Z}_T = \frac{1}{\hat{A}(2,1)}. \quad (6.9)$$

Fázovou chybu lze pak spočítat jako [24]:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\operatorname{Im}\{\hat{Z}_T\}}{\operatorname{Re}\{\hat{Z}_T\}}. \quad (6.10)$$

AC-DC diference je definována jako [24]:

$$\delta_{\text{AC-DC}} = -\frac{Z_{Tm}(f) - Z_{Tm}(0)}{Z_{Tm}(0)} 1000000, [\text{ppm}] \quad (6.11)$$

kde Z_{Tm} je modul přenosové impedance $Z_{Tm} = |\hat{Z}_T|$.

6.2 VÝPOČET MODELU A JEHO NEJISTOT

Vzhledem k tomu, že model, který popisuje bočníky, má počítat jejich vlastnosti na miliontiny, nemusí být přesnost materiálových vlastností DPS (relativní permitivita, ztrátový činitel, měrná vodivost mědi) a parazitní kapacity a indukčnosti osazených rezistorů uváděných v katalogích výrobců dostatečná. Proto byly tyto vlastnosti stanoveny měřením vzorku DPS a vzorku rezistorů [24].

Vzhledem ke složitosti výpočtu impedance bočniců (a následně jejich AC-DC diferencí a fázových chyb) ze značného počtu vstupních veličin daných rozměry a materiálovými vlastnostmi DPS a vlastnostmi použitých rezistorů byla pro výpočet nejistot využita metoda Monte Carlo (MC) [24], [25].

Pro výpočet modelu i jeho nejistot pak byl použit Matlab. V následujících tabulkách jsou uvedeny vypočtené nejpravděpodobnější hodnoty AC-DC diference a fázové chyby bočniců ČMI a jejich směrodatné odchylky (standardní nejistoty).

Tabulka 6.1 Vypočtené průměrné hodnoty AC-DC diference a jejich směrodatné odchylky pro zátěž 90 Ω

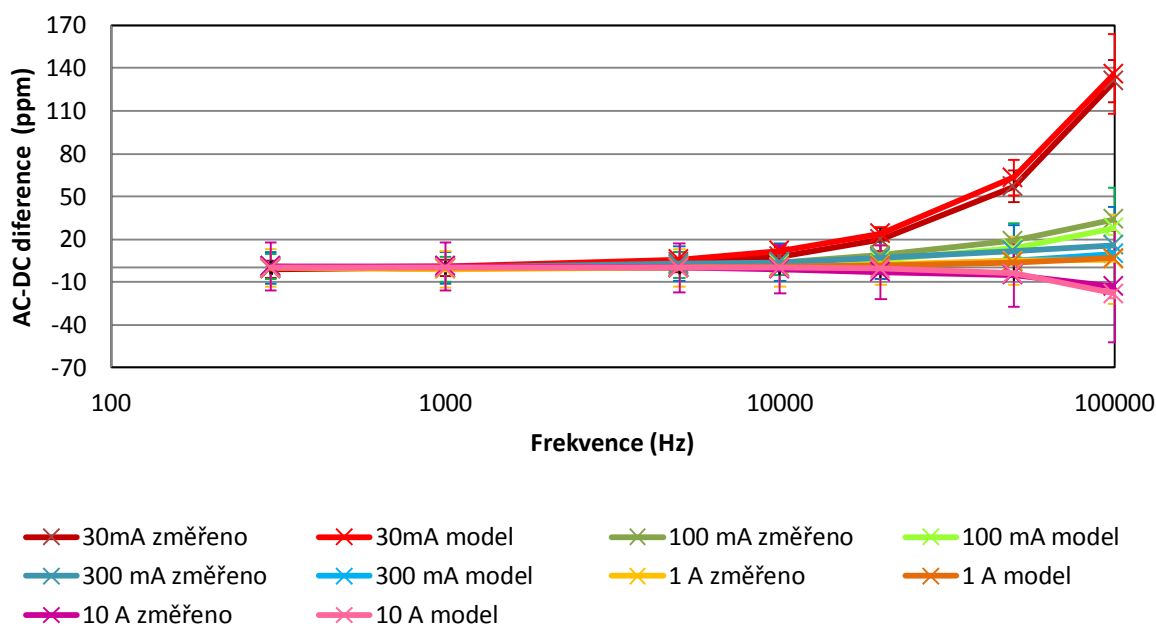
Bočník- proud		Frekvence (kHz)						
		0,5	1	5	10	20	50	100
30 mA	AC-DC (ppm)	0,583	1,179	5,98	12,1	24,5	63,8	136
	Smd.odch.	0,048	0,098	0,50	1,0	2,1	5,5	12
100 mA	AC-DC (ppm)	0,1303	0,263	1,328	2,66	5,34	13,47	27,3
	Smd.odch.	0,0094	0,019	0,094	0,19	0,39	0,98	2,0
300 mA	AC-DC (ppm)	0,0465	0,0940	0,474	0,948	1,90	4,74	9,46
	Smd.odch.	0,0034	0,0068	0,034	0,069	0,14	0,35	0,69
1 A	AC-DC (ppm)	0,0400	0,0808	0,404	0,801	1,57	3,69	6,59
	Smd.odch.	0,0029	0,0058	0,029	0,059	0,12	0,28	0,55
10 A	AC-DC (ppm)	0,01002	0,0192	0,0562	0,011	-0,387	-4,03	-18,3
	Smd.odch.	0,00074	0,0015	0,0069	0,015	0,050	0,32	1,3

Tabulka 6.2 Vypočtené průměrné hodnoty fázové chyby a jejich směrodatné odchylky pro zátěž 50 k Ω

Bočník- proud		Frekvence (kHz)						
		0,5	1	5	10	20	50	100
30 mA	Fáze (μ rad)	-46,4	-92,9	-464	-929	-1857	-4643	-9285
	Smd.odch	3,2	6,4	32	64	127	318	636
100 mA	Fáze (μ rad)	-7,37	-14,7	-74	-148	-295	-737	-1474
	Smd.odch	0,45	0,89	4,5	8,9	18	45	89
300 mA	Fáze (μ rad)	-2,45	-4,90	-24,5	-49,0	-97,9	-245	-490
	Smd.odch	0,21	0,43	2,1	4,3	8,6	21	43
1 A	Fáze (μ rad)	-2,02	-4,05	-20,2	-40,5	-81,0	-202	-405
	Smd.odch	0,20	0,40	2,0	4,0	8,0	20	40
10 A	Fáze (μ rad)	5,06	10,11	50,6	101	202	506	1011
	Smd.odch	0,47	0,95	4,7	9,5	19	47	95

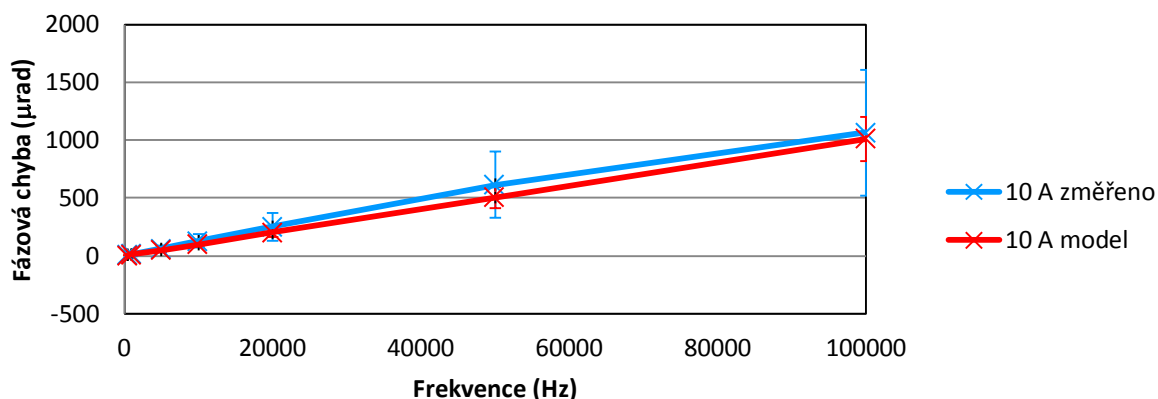
6.3 VERIFIKACE MODELU

AC-DC diference bočníků byla změřena na pracovišti pro měření AC-DC diference proudu, kdy AC-DC diference proudu procházejícího bočníkem byl měřena příslušným etalonem stupnice AC-DC diference proudů (tvořeného planárním termokonvertorem s bočníkem). Během měření byl výstup bočníku zatížen vstupní impedancí použitého termokonvertoru (90 Ω), proto bylo nezbytné při verifikaci vypočítaných hodnot uvažovat hodnoty AC-DC diference vypočítané pro tuto zátěž. V následujícím grafu je vidět porovnání naměřených hodnot AC-DC diference s vypočtenými. Shoda je v rámci nejistot měření u všech bočníků. Maximální odchylka je 7 ppm pro 300 mA bočník na 50 kHz [24].



Obrázek 6.2 Porovnání vypočtených a naměřených AC-DC diferencí bočníků při zátěži 90 Ω

V rámci projektu iMERA-EMRP: Power and Energy bylo provedeno porovnání fázové chyby bočníků pro velké proudy (10 A – 100 A), do kterého byl zahrnut i 10A bočník za sady vyvinuté v ČMI. Při měření byly bočníky zatíženy transformátory s aktivním stíněním (AGT) se vstupní impedancí 50 k Ω . V následujícím grafu je vidět porovnání naměřených hodnot fázové chyby s vypočtenými. Shoda je v rámci nejistot měření, maximální odchylka je 110 μ rad na 50 kHz [24].



Obrázek 6.3 Porovnání vypočtených a naměřených hodnot fázové chyby bočníku 10 A při zátěži 50 k Ω

7 OPTIMALIZACE KONSTRUKCE

S využitím výše popsaného analytického RLC modelu je možné také zjistit možnosti vylepšení stávající konstrukce klecových bočníků ČMI. Cílem případných úprav by měla být minimální frekvenční závislost impedance bočníků, v ideálním případě tedy nulová AC-DC diference a nulová fázová chyba ve sledovaném frekvenčním rozsahu.

Před diskuzí možných konstrukčních úprav je však nejprve nutné studovat vliv změny vstupních parametrů modelu na jeho výstupní veličiny, tedy na AC-DC diferenci a fázovou chybu bočníku.

7.1 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

Citlivostní analýza byla provedena parametrickou simulací s využitím skriptů modelu v Matlabu.

Postupně byl sledován vliv jednotlivých vstupních veličin, které lze rozdělit na ty, jejichž změna významně ovlivní frekvenční charakteristiku bočníku a na ty, jejichž změna na frekvenční charakteristiku vliv nemá (resp. je nevýznamný).

Mezi vstupní veličiny, jejichž změna významně neovlivní frekvenční charakteristiku bočníku, lze zařadit:

- tloušťka Cu vrstvy DPS,
- měrná vodivost použitých materiálů,
- typ (rozměry a materiálové vlastnosti) vstupních konektorů,
- relativní permeabilita.

Vstupní veličiny, které významně ovlivňují frekvenční charakteristiku bočnicku, jsou:

- parazitní kapacita a indukčnost použitých rezistorů,
- dielektrické vlastnosti DPS (relativní permitivita, ztrátový činitel),
- tloušťka DPS,
- změny rozměrů jednotlivých dílů a počtu příček.

7.2 VYLEPŠENÍ KONSTRUKCE

Citlivostní analýza ukázala, že na impedanci (AC-DC diferenci a fázovou chybu) bočnicků mají velký vliv vlastnosti použité DPS, méně pak vlastnosti rezistorů. Kritickým konstrukčním dílem jsou příčky.

Na základě těchto zjištění je možné navrhnout úpravu konstrukce pro již navržené hodnoty bočnicků 30 mA / 50 Ω , 100 mA / 10 Ω , 300 mA / 3,3 Ω , 1 A / 1 Ω , 10 A / 0,1 Ω , stejně tak jako provést optimální návrh jakékoli jiné požadované hodnoty bočnicku, např. pro bočnicku na velké proudy: 20 A / 0,04 Ω , 50 A / 0,016 Ω nebo 100 A / 0,008 Ω .

Cílem byla AC-DC diference menší než 10 ppm a fázová chyba menší než 100 μ rad na 5 A a 100 kHz a AC-DC diference menší než 50 ppm a fázová chyba menší než 500 μ rad na 100 A a 100 kHz, což jsou shodné parametry, které byly zvoleny za cíl v konstrukci precizních bočnicku v projektu iMERA-EMRP: Power and Energy. V tomto projektu se je podařilo splnit konstrukcí foliových bočnicků, u klecových nebyl splněn požadavek na fázovou chybu.

7.2.1 Optimalizace konstrukce existujících bočnicků

Optimalizace konstrukce sady bočnicků ČMI byla provedena se zachováním jejich nominální hodnoty odporu a počtu a typu osazovaných rezistorů.

Pro konstrukci všech bočnicků byla vybrána vysokofrekvenční DPS tloušťky 2,5 mm, která má výrazně lepší dielektrické vlastnosti než FR4, která byla použita pro konstrukci stávající sady. Příčky byly zkráceny na minimum, plošný spoj na nich byl zúžen na 2 mm.

U 30mA a 100mA bočnicku byl upraven počet příček na tři, resp. pět. Rozměry desek a kruhu 30mA a 10A bočnicku byly zvoleny shodné s rozměry 100mA bočnicku, resp. S rozměry 1A bočnicku.

U 30mA až 1A bočnicků se místo oboustranné DPS pro konstrukci příček požíly dvě jednostranné DPS nevodivou vrstvou přiložené k sobě kvůli snížení kapacity příček (indukčnost a kapacita rezistorů byla adekvátně navýšena o delší nožičky). Naopak u 10A bočnicku byla použita oboustranná DPS tloušťky 1 mm z důvodu zkrácení nožiček u rezistorů a tím snížení jejich indukčnosti, která majoritně ovlivňuje fázovou chybu 10A bočnicku.

Optimalizované vlastnosti bočnicků jsou uvedeny v tabulce 7.1. Aby byla splněna maximální dovolená fázová chyba stanovená v předcházející kapitole, bylo nezbytné

při teoretických simulacích doplnit rezistory u 30mA a 100mA bočnicku o sériovou indukčnost vhodné velikosti, u 10 bočnicku pak o paralelní kapacitu.

V tabulce 7.2 je pak uvedena AC-DC diference a fázová chyba optimalizované konstrukce bočnicků.

Tabulka 7.1 Optimalizované hodnoty parametrů konstrukčních dílů

Parametr	Hodnota pro 30mA bočník	Hodnota pro 100mA bočník	Hodnota pro 300mA bočník	Hodnota a pro 1A bočník	Hodnota pro 10A bočník	Rozměr
Počet příček	3	5	10	25		-
Počet rezistorů na příčce	1	2	3	4		-
Odpor	149,981	99,979	99,979	99,979	9,9971	Ω
Indukčnost	27	26,5	26,5	26,5	15	nH
Kapacita	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	pF
Sériová indukčnost	230	25	-	-	-	nH
Paralelní kapacita	-	-	-	-	150	pF
Šířka příčky (plošného spoje)	0,012 (0,002)					m
Délka příčky	0,035	0,040	0,045	0,050	0,04	m
Rozměr desky	0,072			0,136		m
Poloměr kruhu	0,031			0,063		m
Tloušťka DPS desek a kruhu	0,0025				0,0025	m
Tloušťka DPS příček	2 x 0,0025				0,001	m
Ztrátový činitel DPS	0,0019					-
Relativní permitivita DPS	2,5					-

Tabulka 7.2 Vypočtené hodnoty AC-DC diference (zátěž 90 Ω) a fázové chyby (zátěž 50 kΩ) bočníků s optimalizovanou konstrukcí

Bočník- proud	Parametr	Frekvence (kHz)						
		0,1	0,5	1	10	30	50	100
30 mA	AC-DC (ppm)	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1
	Fáze (μrad)	0	0	-1	-7	-21	-35	-70
100 mA	AC-DC (ppm)	0	0	0	0	0,1	0,1	0,2
	Fáze (μrad)	0	0	0	-0,3	-0,9	-1,5	-3,0
300 mA	AC-DC (ppm)	0	0	0	0	0	0	0
	Fáze (μrad)	0	0	-0,3	-2,6	-8	-13	-26
1 A	AC-DC (ppm)	0	0	0	0	0	-0,1	-0,6
	Fáze (μrad)	0	0	-0,3	-3	-10	-16	-32
10 A	AC-DC (ppm)	0	0	0	0	-0,1	-0,3	-1,4
	Fáze (μrad)	0	-0,2	-0,5	-4,5	-14	-23	-45

7.2.2 Zásady konstrukce bočníků nad 10 A

Pro teoretický návrh konstrukce bočníků pro 20 A, 50 A a 100 A byly zvoleny stejné nominální hodnoty odporu jako u již existujících klecových bočníků SP: 20 A/0,04 Ω (100 x 4 Ω), 50 A/0,016 Ω (180 x 3 Ω), 100 A/ 0,008 Ω (240 x 2 Ω).

Byla zvolena opět vysokofrekvenční DPS (permitivita 2,5 a ztrátový činitel 0,0019) jednostranná tloušťky 2,5 mm pro desky a kruh a oboustranná tloušťky 1 mm pro příčky.

Pro simulace návrhu konstrukce 20A bočníku byl počet příček zvolen 25 (na každé příčce by měly být osazeny čtyři rezistory), u 50A bočníku pak 60 (na každé příčce budou osazeny tři rezistory) a u 100A bočníku byl počet příček stanoven na 60 se čtyřmi rezistory na každé příčce.

Délka příček byla optimalizována podle počtu osazených rezistorů na 50 mm u 20A a 100A bočníku a 45 mm u 50A. Šířka plošného spoje na příčce byla zvolena 2 mm (stejná jako při optimalizaci existujících bočníků).

Rozměry desek a kruhu pak korespondují s počtem příček: u 20A bočníku byly zvoleny stejné rozměry jako u 1A bočníku, u 50A a 100A bočníku byla deska zvětšena na 306x306 mm a kruh na průměr 296 mm.

U rezistorů byla parazitní indukčnost odhadnuta na 8,5 nH/4 Ω a 7,5 nH/3 Ω a 6,5 nH/2 Ω a parazitní kapacita na 1,7 pF.

Výsledky simulací jsou uvedeny v tabulce 7.3. Pro kompenzaci frekvenční charakteristiky musely být použity kondenzátory paralelně připojené k rezistorům o velikosti 620 pF u 20A bočníku, 1200 pF u 50A bočníku a 2650 pF u 100A bočníku.

Tabulka 7.3 Vypočtené hodnoty AC-DC difference (zátěž 90 Ω) a fázové chyby (zátěž 50 k Ω) bočníků 20 A, 50 A, 100 A

Bočník -proud	Parametr	Frekvence (kHz)						
		0,1	0,5	1	10	30	50	100
20 A	AC-DC (ppm)	0	0	0	0	-1	-2	-8
	Fáze (μ rad)	0	2	4	44	132	220	439
50 A	AC-DC (ppm)	0	0	0	0	-2	-5	-22
	Fáze (μ rad).	0	2	4	45	134	224	447
100 A	AC-DC (ppm)	0	0	0	0	-3	-7	-29
	Fáze (μ rad)	0	2	4	43	129	215	431

8 ZÁVĚR

Disertační práce se zabývá vývojem vylepšených precizních klecových bočníků pro měření střídavých proudů v rozsahu 10 mA až 100 A na frekvencích 10 Hz až 100 kHz.

K již existující sadě pěti klecových bočníků ČMI byl vytvořen analytický model založený na výpočtu přenosové impedance bočníků z kaskádní matice, která byla sestavena jako součin kaskádních matic pasivních dvojbranů reprezentujících jednotlivé konstrukční díly bočníků. Z přenosové impedance pak lze snadno spočítat AC-DC diferenci a fázovou chybu, co jsou u bočníků dva základní kalibrované parametry. Pro výpočet nejistot modelu byla použita metoda Monte Carlo.

Z nutnosti verifikovat platnost modelu bylo třeba na pracovišti zajistit vhodné měřicí metody. V měření fázové chyby byla zajištěna spolupráce s italským NMI (INRIM) v rámci projektu iMERA-EMRP: Power and Energy. Pro měření AC-DC difference odporu bylo využito pracoviště pro odvozování stupnice AC-DC difference proudů.

Vzhledem k tomu, že se bočníky využívají zejména při odvozování stupnice AC-DC difference proudů ve velkém proudovém rozsahu, bylo nutné také ověřit velikost výkonového a návazně i teplotního koeficientu. Pro tato měření bylo upraveno pracoviště pro měření stejnosměrného odporu.

Verifikace modelu pak ukázala shodu lepší než 7 ppm u AC-DC difference pro všechny bočníky. Výpočet fázové chyby byl ověřen u 10A bočniku, kde byla shoda lepší než 111 μ rad.

Pomocí analytického modelu pak byla provedena citlivostní analýza změny výstupních veličin (AC-DC difference a fázové chyby) na změně vstupních veličin (materiálové vlastnosti DPS, parazitní indukčnost a kapacita rezistorů, změna rozměrů), na základě které byla navržena optimalizace existující sady bočníků ČMI a dále byl proveden teoretický návrh konstrukce 20A, 50A a 100A bočniku.

LITERATURA

- [1] TARASSO, V., ZACHOVALOVA, V.N., GARCOCZ, M., LIND, K., MANSTEN, T., POGLIANO, U., RIETVELD, G., VOLJC, B. A Survey of Current Shunts for AC Power Measurements. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2010*, Daejeon (Korea): KRISS, 2010, p. 231-232. ISBN 978-1-4244-6794-5.
- [2] NOVAKOVA ZACHOVALOVA, V. AC-DC Current Transfer Difference in CMI. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2008*. Boulder (USA): NIST, 2008, p. 362-363. ISBN 978-1-4244-2400-9.
- [3] STREIT, J., NOVÁKOVÁ ZACHOVALOVÁ, V., HORSKÁ, J., HORSKÝ, J., MIČÁNEK, L., ŠEFČÍK, K. *Rozvoj etalonáže stejnosměrných a střídavých elektrických veličin. Závěrečná zpráva č. 6011-TR-Z001-07 o plnění úkolu TR č. 760111 (součást PRM č. III/5/07)*. Brno: ČMI, 2007.
- [4] SVENSSON, S., RYDLER, K. E., TARASSO, V. Improved Model and Phase-angle Verification of Current Shunts for AC and Power Measurements. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2004*. London (UK), 2004, p. 82-83. ISBN 0-7803-8494-6.
- [5] SVENSSON, S. *Power Measurement Techniques for Nonsinusoidal Conditions*. Goteborg: Chalmers University of Technology, 1999. 153 pages. ISBN 91-7197-760-0.
- [6] LIND, K., SORSDAL, T., SLINDE, H. High-performance AC-DC Current Shunts From Inexpensive Components. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2006*. Torino (Italy): C:L.U.T., 2006, p. 240-241. ISBN 88-7992-228-9.
- [7] MANSTEN T., RAUTIAINEN, A., HELISTO, P. New AC Current Shunts of MIKES. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2002*. Ottawa (Canada): NRC, 2002, p. 370-371. ISBN 0-7803-7243-5.
- [8] PINTER, B., LINDIC, M., VOLJC, B., SVETIK, Z., LAPUH, R. Modeling of AC/DC Current Shunts. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2010*, Daejeon (Korea): KRISS, 2010, p.599-600. ISBN 978-1-4244-6794-5.
- [9] B. Voljč, M. Lindič, B. Pinter, R. Lapuh, Z.Svetik COAXIAL CURRENT SHUNTS FROM 1 mA TO 100 A. In *Proceedings of the Power and Energy Workshop*. [online]. Noordwijk (The Netherlands): 2011 [cit. 25. 5. 2013]. Dostupné z WWW: http://projects.npl.co.uk/power_energy.
- [10] POGLIANO, U., BOSCO, G. C., SERAZIO, D. Coaxial Shunts as AC-DC Transfer Standards of Current. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2009, vol. 58, no. 4, p. 872-877. ISSN 0018-9456.
- [11] GARCOCZ, M., SCHEIBENREITER, P., WALDMANN, W., HEINE G. Expanding the Measurement Capability for AC-DC Current Transfer at BEV. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2004*. London (UK),2004, p. 461-462. ISBN 0-7803-8494-6.
- [12] GARCOCZ, M. AC/DC Transfer at BEV 2003 to 2005. [online, CD-ROM]. In *Proceedings of the TC-EM SC-LF meeting 2005*. Madrid, 2005. K dispozici členům EURAMETu na www.euramet.org.
- [13] GARCOCZ, M. Experiences with AC-DC voltage and current. [online, CD-ROM]. In *Proceedings of the TC-EM SC-LF meeting 2007*. Espoo, 2007. K dispozici členům EURAMETu na www.euramet.org.
- [14] NOVÁKOVÁ ZACHOVALOVÁ, V., INDRA, L., ŠÍRA, M. Measurement System for DC Characterization of Low Resistance Standards. In *Proceedings National Conference of*

- Standards Laboratories NCSL 2009 International Workshop and Symposium*. [CD-ROM]. San Antonio (USA), 2009.
- [15] NOVÁKOVÁ ZACHOVALOVÁ, V., ŠÍRA, M., STREIT, J., INDRA, L. Measurement system for high current shunts DC characterization at CMI. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2010*. Daejon (Korea): KRISS, 2010, p.607-608. ISBN 978-1-4244-6794-5.
- [16] NOVÁKOVÁ ZACHOVALOVÁ, V., ŠÍRA, M., STREIT, J., INDRA, L. Measurement system for high current shunts DC characterization at CMI. In *Proceedings of the Power and Energy Workshop*. [online]. Noordwijk (The Netherlands): 2011 [cit. 25. 5. 2013]. Dostupné z WWW: http://projects.npl.co.uk/power_energy.
- [17] WRIGHT, P. a spol. Final Publishable JRP Report: Power and Energy. [online]. 2011. 36 stran. [cit. 25. 5. 2013]. Dostupné z WWW: http://projects.npl.co.uk/power_energy.
- [18] NOVÁKOVÁ ZACHOVALOVÁ, V., ŠÍRA, M., STREIT, J. Current and frequency range extension of AC-DC current transfer difference measurement system at CMI. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2010*. Daejon (Korea): KRISS, 2010, p. 605-606. ISBN 978-1-4244-6794-5.
- [19] STREIT, J., NOVÁKOVÁ ZACHOVALOVÁ, V., HORSKÁ, J., ŠÍRA, M., HORSKÝ, J., MIČÁNEK, L., ŠEFČÍK, K. *Rozvoj etalonáže stejnosměrných a střídavých elektrických veličin. Závěrečná zpráva č. 6011-TR-Z001-08 o plnění úkolu TR č. 860111 (součást PRM č. III/5/08)*. Brno: ČMI, 2008.
- [20] STREIT, J., NOVÁKOVÁ ZACHOVALOVÁ, V., HORSKÁ, J., ŠÍRA, M., JAKUBÍK, P., MIČÁNEK, L. *Rozvoj etalonáže stejnosměrných a střídavých elektrických veličin. Závěrečná zpráva č. 6011-TR-Z001-09 o plnění úkolu TR č. 960111 (součást PRM č. III/5/09)*. Brno: ČMI, 2009.
- [21] POGLIANO, U., SERAZIO, D., TRINCHERA, B. Wideband phase comparator for high current shunts. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2010*. Daejon (Korea): KRISS, 2010, p. 135-136. ISBN 978-1-4244-6794-5.
- [22] BUDOVSKY, I. Measurement of Phase Angle Errors of Precision Current Shunts in the Frequency Range From 40 Hz to 200 kHz. *IEEE Trans. Instrum. and Meas.* 2007, vol. 56, no. 2, p. 284-288. ISSN 0018-9456.
- [23] BOSCO, G.C., GARCOCZ, M., LIND, K., POGLIANO, U., RIETVELD, G., TARASSO, V., VOLJC, B., NOVÁKOVÁ ZACHOVALOVÁ, V. Phase Comparison of High-Current Shunts up to 100 kHz. *IEEE Trans. Instrum. and Meas.* 2011, vol. 60, no. 7, p. 2359-2365. ISSN 0018-9456.
- [24] NOVÁKOVÁ ZACHOVALOVÁ, V. On The Current Shunts Modeling. Submitted to *IEEE Trans. Instrum. and Meas.* Accepted.
- [25] JCGM: *Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" – Propagation of distributions using a Monte Carlo method*. [online]. 82 stran. 1. vydání. 2008. [cit. 25. 5. 2013]. Dostupné z WWW: <http://www.euramet.org>.

CURRICULUM VITAE

Jméno a příjmení: Věra Nováková Zachovalová
Datum narození: 14. 1. 1982
Stav: vdaná
Trvalé bydliště: Marie Pavlíkové 1894, 666 01 Tišnov
email: v.novakova@ladinn.cz

Dosažené vzdělání:

1988 – 1993 Základní škola Letonice – 1. až 4. třída,
Základní škola Bučovice, Školní 711 – 5. třída
1993 – 2000 Gymnázium Bučovice, Součkova 500
- zakončeno maturitou s vyznamenáním (Čj, Nj, Fy, Ma)
2000 – 2005 Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT Brno,
Údolní 53, Brno, obor Kybernetika, automatizace a měření
- zakončeno s vyznamenáním, červený diplom

Středoškolská odborná činnost 1998 - 1999:

Téma: Fotovoltaický jev u diod LED
Vedoucí: Mgr. Miroslav Poláček
Umístění: 8. místo ve státním kole

Diplomová práce:

Téma: Přesná měření malých střídavých napětí
Vypracováno: na pracovišti Českého metrologického institutu Brno
Vedoucí: Ing. Marie Havlíková
Konzultanti: doc. Ing. Jiří Horský, CSc., Ing. Jana Horská, PhD. (ČMI)

Praxe:

2003 – 2004 pomocná měření na pracovišti ČMI OI Brno, Oddělení ss a nf
elektrických veličin – odpovědný pracovník Ing. Jiří Streit
Od září 2005 zaměstnána jako metrolog na Odd. ss a nf elektrických veličin
ČMI OI Brno – odpovědný pracovník Ing. Jiří Streit

ABSTRAKT

Disertační práce se zabývá vývojem vylepšených precizních klecových bočníků pro měření střídavých proudů v rozsahu 10 mA až 100 A, 10 Hz až 100 kHz.

Hlavním cílem disertace je vytvoření teoretického modelu existujících klecových bočníků, s jehož využitím bude možné navrhnout novou, vylepšenou konstrukci klecových bočníků.

V disertační práci byl vytvořen analytický model klecových bočníků ČMI založený na výpočtu přenosové impedance bočníků z kaskádní matice pasivního dvojbranu reprezentujícího bočník. Z přenosové impedance pak byla spočítána AC-DC diference a fázová chyba, co jsou u bočníků dva základní kalibrované parametry. Pro výpočet nejistot modelu byla použita metoda Monte Carlo. Z nutnosti ověřit platnost modelu se disertační práce také zabývá vhodnými měřicími metodami fázové chyby, AC-DC diference, a také výkonového a teplotního koeficientu. Tyto měřicí metody byly poté použity pro kalibrace existujících bočníků, čímž byla zajištěna verifikace modelu. Práce je zakončena teoretickou optimalizací konstrukce existující sady bočníků ČMI a teoretickým návrhem konstrukce 20A, 50A a 100A bočníku, které vycházejí z výsledků citlivostní analýzy.

ABSTRACT

This dissertation focuses on development of improved cage shunts for measurement of alternating currents in range 10 mA - 100 A, 10 Hz - 100 kHz.

Main objective of this dissertation is to develop theoretical model of existing cage shunts, which will assist design of new improved cage shunts construction.

In this dissertation the analytical model of CMI cage shunts was established, based on calculating of the trans-impedance from the cascade matrix of passive two-port which is representing the shunt. The trans-impedance can be used for the AC-DC difference and phase error calculation, which are two basic parameters of the shunts. The uncertainty analysis of the model was done by means of Monte Carlo method. Next, this dissertation also concentrates on suitable measurement methods of the phase error, AC-DC difference, and power a temperature coefficient of resistance. These measurements method were used for the calibration of the existing cage shunts and the calculated values of the model were compared with the measured values. Finally, a theoretical optimization of the existing CMI cage shunts constructions and theoretical designs of 20A, 50A and 100A shunts were done.