



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## PŘESNÁ MĚŘENÍ STŘÍDAVÝCH PROUDŮ

ACCURATE AC CURRENTS MEASUREMENTS

DOKTORSKÁ PRÁCE  
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. Věra Nováková Zachovalová

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

BRNO 2013

## Abstrakt

Oblast přesného měření střídavých proudů je v posledních letech silně se rozvíjející problematikou zejména z důvodu velkého rozvoje metrologie elektrického výkonu, který souvisí s prosazováním většího šetření elektrické energie.

Z toho důvodu jsou kladeny požadavky na přesnější měření elektrické energie a výkonu a také kvality elektrické energie. Dochází ke zvětšování měřeného rozsahu a k rozšiřování požadovaných frekvenčních bodů i nad tzv. výkonové frekvence (50 Hz až 400 Hz) až do 100 kHz. Je snaha vyvíjet měřicí převodníky proud – napětí s normalizovaným napěťovým výstupem (0,5 V až 1 V) pro jejich univerzální začleňování do měřicích systémů.

Z poměrně široké problematiky tohoto aktuálního tématu 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.

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.

**Klíčová slova:** měření elektrického výkonu, měření elektrického proudu, proudový bočník, klecový bočník, model bočníku, metoda Monte Carlo.

## Abstract

In recent years the precision measurement of alternating currents goes through large progress especially because of improvements in metrology of electric power, which is related to reduction of electricity consumption.

Therefore, more precise measurement of electric energy, power and power quality is required. The measurement range is extending and number of measured frequency points is growing up to 100 kHz. Development of current to voltage transducer with normalized output voltage (0,5 V - 1 V) is in progress because of their easy integration in different measuring systems.

From big area of alternating current metrology 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's cage shunts was established, based on calculating of trans-impedance from cascade matrix of passive two-port which is representing the shunt. The trans-impedance can be used for AC-DC difference and phase error calculation, which are two basic parameters of shunts. Uncertainty analysis of the model was done by means of Monte Carlo method. Next, this dissertation also concentrates on suitable measurement methods of phase error, AC-DC difference, and power a temperature coefficient of resistance. These measurements method were used for calibration of existing CMI's cage shunts and so the model's verification was made. Finally, theoretical optimization of existing CMI's cage shunts constructions and theoretical designs of 20A, 50A and 100A shunts were done using sensitivity analysis results.

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

## Bibliografická citace

NOVÁKOVÁ ZACHOVALOVÁ, V. *Přesná měření střídavých proudů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 99 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D..

## Prohlášení

„Prohlašuji, že svou disertační práci na téma *Přesná měření střídavých proudů* jsem vypracovala samostatně pod vedením školitele a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené disertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této disertační práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně, dne:

Podpis:

## Poděkování

Děkuji svému školiteli panu doc. Ing. Petru Benešovi, PhD. za dobré vedení a také svým kolegům z Českého metrologického institutu za podporu a motivaci.

Dále děkuji manželovi za neobyčejnou podporu a trpělivost po celou dobu mého studia.

Tato práce byla podporována Českým metrologickým institutem a částečně financována z Programu rozvoje metrologie a projektu EURAMET Power and Energy, který spadá pod 7. rámcový program Evropské komise (ERA-NET Plus), grant č. 217257.

## Obsah

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Úvod</b>                                                         | <b>1</b>  |
| <b>2. Úvod do metrologie střídavého elektrického proudu</b>            | <b>2</b>  |
| <b>3. Převodníky pro měření elektrického proudu</b>                    | <b>5</b>  |
| 3.1 Termokonvertory                                                    | 5         |
| 3.2 Proudové bočníky                                                   | 7         |
| 3.2.1 Klecové bočníky                                                  | 8         |
| 3.2.2 Foliové bočníky                                                  | 15        |
| 3.3 Rogowského cívky                                                   | 16        |
| 3.4 Měřicí transformátory                                              | 16        |
| <b>4. Měřicí systémy střídavého proudu</b>                             | <b>17</b> |
| 4.1 Systémy pro měření efektivní hodnoty proudu                        | 17        |
| 4.2 Systémy pro měření výkonu                                          | 18        |
| <b>5. Cíle disertace</b>                                               | <b>20</b> |
| <b>6. Měřicí metody</b>                                                | <b>21</b> |
| 6.1 Měření stejnosměrného odporu, teplotního a výkonového koeficientu  | 21        |
| 6.1.1 Měření výkonového koeficientu bočnicků                           | 23        |
| 6.1.2 Měření teplotního koeficientu bočnicků                           | 24        |
| 6.2 AC-DC difference bočnicků                                          | 25        |
| 6.3 Měření fázové chyby bočnicků                                       | 27        |
| <b>7. Kalibrace sady bočnicků ČMI</b>                                  | <b>30</b> |
| 7.1 Kalibrace TCR a PCR bočnicků                                       | 30        |
| 7.2 Kalibrace AC-DC difference odporu bočnicků                         | 32        |
| 7.3 Kalibrace fázové chyby bočnicků                                    | 32        |
| <b>8. Modelování bočnicků</b>                                          | <b>33</b> |
| 8.1 Vývoj analytického modelu                                          | 33        |
| 8.1.1 Modelování konstrukčních částí                                   | 34        |
| 8.1.2 Sestavení analytického modelu                                    | 40        |
| 8.2 Výpočet modelu                                                     | 41        |
| 8.2.1 Určení vlastností použitých komponentů                           | 41        |
| 8.2.2 Výpočet R, L, C konstrukčních dílů                               | 43        |
| 8.2.3 Výpočet impedance, AC-DC difference a fázové chyby celého modelu | 48        |
| 8.3 Výpočet nejistot                                                   | 49        |

|            |                                                                               |           |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 8.3.1      | Vytvoření matematického modelu děje                                           | 50        |
| 8.3.2      | Určení nejistot a rozložení vstupních veličin                                 | 50        |
| 8.3.3      | Provedení dostatečného počtu simulací                                         | 51        |
| 8.3.4      | Zpracování výpočetních hodnot, určení nejpravděpodobnější hodnoty a nejistoty | 52        |
| 8.4        | Verifikace modelu                                                             | 54        |
| 8.4.1      | Verifikace AC-DC difference                                                   | 54        |
| 8.4.2      | Verifikace fázové chyby                                                       | 55        |
| <b>9.</b>  | <b>Optimalizace konstrukce</b>                                                | <b>56</b> |
| 9.1        | Citlivostní analýza                                                           | 56        |
| 9.1.1      | Vstupní veličiny neovlivňující vlastnosti bočnicku                            | 56        |
| 9.1.2      | Vstupní veličiny ovlivňující vlastnosti bočnicku                              | 57        |
| 9.2        | Vylepšení konstrukce                                                          | 66        |
| 9.2.1      | Výběr DPS                                                                     | 66        |
| 9.2.2      | Výběr rezistorů                                                               | 67        |
| 9.2.3      | Úprava rozměrů                                                                | 68        |
| 9.2.4      | Optimalizace konstrukce stávajících bočníků                                   | 68        |
| 9.2.5      | Zásady konstrukce bočníků nad 10 A                                            | 80        |
| <b>10.</b> | <b>Shrnutí dosažených výsledků</b>                                            | <b>83</b> |
| <b>11.</b> | <b>Závěr</b>                                                                  | <b>84</b> |
|            | <b>Literatura</b>                                                             | <b>85</b> |
|            | <b>Seznam zkratk</b>                                                          | <b>91</b> |
|            | <b>Seznam použitých symbolů</b>                                               | <b>94</b> |

## Seznam obrázků

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 2.1 Obecné schéma návaznosti stejnosměrných a nízkofrekvenčních elektrických veličin.....   | 2  |
| Obrázek 3.1 Termokonvertory.....                                                                    | 6  |
| Obrázek 3.2 Konstrukce bočníků MIKES s opačným směrem proudu v navzájem sousedních rezistorech..... | 8  |
| Obrázek 3.3 T model bočníků MIKES .....                                                             | 9  |
| Obrázek 3.4 Konstrukce bočníků JV .....                                                             | 10 |
| Obrázek 3.5 Model bočníků JV .....                                                                  | 10 |
| Obrázek 3.6 Konstrukce bočníků SP .....                                                             | 11 |
| Obrázek 3.7 Model bočníků SP .....                                                                  | 12 |
| Obrázek 3.8 Zjednodušené náhradní schéma bočníku.....                                               | 12 |
| Obrázek 3.9 Konstrukce bočníků SIQ .....                                                            | 13 |
| Obrázek 3.10 Model bočníků SIQ .....                                                                | 13 |
| Obrázek 3.11 Konstrukce bočníků ČMI .....                                                           | 14 |
| Obrázek 3.12 Proudový foliový bočník.....                                                           | 15 |
| Obrázek 3.13 Konstrukce foliových bočníků BEV .....                                                 | 15 |
| Obrázek 3.14 Zjednodušený model foliového bočníku BEV .....                                         | 15 |
| Obrázek 3.15 Upravený model foliového bočníku BEV .....                                             | 16 |
| Obrázek 3.16 Princip Rogowského cívky.....                                                          | 16 |
| Obrázek 4.1 Možný průběh krokování pro odvození stupnice .....                                      | 17 |
| Obrázek 6.1 Blokové schéma zapojení pro měření DCR .....                                            | 22 |
| Obrázek 6.2 Schéma návaznosti kalibrace pracovních etalonů DCR.....                                 | 22 |
| Obrázek 6.3 Pracoviště pro měření TCR .....                                                         | 25 |
| Obrázek 6.4 Blokové schéma automatického měřicího systému pro AC-DC diferenci proudů.....           | 26 |
| Obrázek 6.5 AC-DC difference odporu bočníku 5 A švédské konstrukce .....                            | 27 |
| Obrázek 7.1 Opakovatelnost měření TCR (vpravo) a PCR (vlevo) 10 A bočníku .....                     | 31 |
| Obrázek 7.2 Závislost odporu bočníku 10 A na teplotě (vpravo) a proudu (vlevo) .....                | 31 |
| Obrázek 7.3 Závislost odporu bočníku 10 A na teplotě (kombinace měření TCR a PCR) .....             | 31 |
| Obrázek 8.1 3D vizualizace bočníku ČMI konstrukce pro 100 mA.....                                   | 33 |
| Obrázek 8.2 Dvojbran vstupního konektoru.....                                                       | 34 |
| Obrázek 8.3 Dvojbran vstupní části bočníku.....                                                     | 35 |
| Obrázek 8.4 Dvojbran pro příčky .....                                                               | 36 |
| Obrázek 8.5 Dvojbran rezistorů.....                                                                 | 38 |
| Obrázek 8.6 Dvojbran výstupní části.....                                                            | 39 |
| Obrázek 8.7 Dvojbran výstupního konektoru.....                                                      | 40 |
| Obrázek 8.8 Model bočníku.....                                                                      | 40 |

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 8.9 Princip MC metody .....                                                                                 | 49 |
| Obrázek 8.10 Histogram dat AC-DC difference na 100 kHz 10 A bočníku, $M = 2e5$ ....                                 | 52 |
| Obrázek 8.11 Distribuční funkce AC-DC difference na 100 kHz 10 A bočníku, $M = 2e5$<br>.....                        | 52 |
| Obrázek 8.12 Histogram dat fázové chyby na 100 kHz 10 A bočníku, $M = 2e5$ .....                                    | 53 |
| Obrázek 8.13 Distribuční funkce fázové chyby na 100 kHz 10 A bočníku, $M = 2e5$ ....                                | 53 |
| Obrázek 8.14 Porovnání vypočtených a naměřených AC-DC diferencí bočnicků při<br>zátěži 90 $\Omega$ .....            | 55 |
| Obrázek 8.15 Porovnání vypočtených a naměřených hodnot fázové chyby bočnicku 10 A<br>při zátěži 50 k $\Omega$ ..... | 55 |
|                                                                                                                     |    |
| Obrázek 9.1 Závislost AC-DC difference na změně kapacity rezistorů, $f = 100$ kHz .....                             | 57 |
| Obrázek 9.2 Závislost fázové chyby na změně kapacity rezistorů, $f = 100$ kHz .....                                 | 58 |
| Obrázek 9.3 Závislost AC-DC difference na změně indukčnosti rezistorů, $f = 100$ kHz ..                             | 58 |
| Obrázek 9.4 Závislost fázové chyby na změně indukčnosti rezistorů, $f = 100$ kHz .....                              | 59 |
| Obrázek 9.5 Závislost AC-DC difference na změně relativní permitivity DPS, $f = 100$<br>kHz .....                   | 59 |
| Obrázek 9.6 Závislost fázové chyby na změně relativní permitivity DPS, $f = 100$ kHz ..                             | 60 |
| Obrázek 9.7 Závislost AC-DC difference na změně ztrátového činitele DPS, $f = 100$ kHz<br>.....                     | 60 |
| Obrázek 9.8 Závislost fázové chyby na změně ztrátového činitele DPS, $f = 100$ kHz ..                               | 61 |
| Obrázek 9.9 Závislost AC-DC difference na změně tloušťky DPS, $f = 100$ kHz .....                                   | 61 |
| Obrázek 9.10 Závislost fázové chyby na změně tloušťky DPS, $f = 100$ kHz .....                                      | 62 |
| Obrázek 9.11 Závislost AC-DC difference na změně šířky příčky, $f = 100$ kHz .....                                  | 62 |
| Obrázek 9.12 Závislost AC-DC difference na změně délky příčky, $f = 100$ kHz .....                                  | 63 |
| Obrázek 9.13 Závislost fázové chyby na změně šířky příčky, $f = 100$ kHz .....                                      | 63 |
| Obrázek 9.14 Závislost fázové chyby na změně délky příčky, $f = 100$ kHz .....                                      | 64 |
| Obrázek 9.15 Závislost AC-DC difference na změně počtu příček, $f = 100$ kHz .....                                  | 64 |
| Obrázek 9.16 Závislost fázové chyby na změně počtu příček, $f = 100$ kHz .....                                      | 65 |
| Obrázek 9.17 Frekvenční závislost AC-DC difference při prvním kroku optimalizace 30<br>mA bočnicku .....            | 69 |
| Obrázek 9.18 Frekvenční závislost fázové chyby při prvním kroku optimalizace 30 mA<br>bočnicku .....                | 69 |
| Obrázek 9.19 Frekvenční závislost AC-DC difference při druhém kroku optimalizace 30<br>mA bočnicku .....            | 69 |
| Obrázek 9.20 Frekvenční závislost fázové chyby při druhém kroku optimalizace 30 mA<br>bočnicku .....                | 70 |
| Obrázek 9.21 Frekvenční závislost AC-DC difference pro optimalizovaný 30 mA bočník<br>.....                         | 70 |
| Obrázek 9.22 Frekvenční závislost fázové chyby pro optimalizovaný 30 mA bočník ..                                   | 71 |
| Obrázek 9.23 Frekvenční závislost AC-DC difference při optimalizaci 100 mA bočnicku<br>.....                        | 71 |
| Obrázek 9.24 Frekvenční závislost fázové chyby při optimalizaci 100 mA bočnicku ....                                | 72 |
| Obrázek 9.25 Frekvenční závislost AC-DC difference při druhém kroku optimalizace<br>100 mA bočnicku .....           | 72 |
| Obrázek 9.26 Frekvenční závislost fázové chyby při druhém kroku optimalizace 100<br>mA bočnicku .....               | 73 |
| Obrázek 9.27 Frekvenční závislost AC-DC difference pro optimalizovaný 100 mA<br>bočník .....                        | 73 |
| Obrázek 9.28 Frekvenční závislost fázové chyby pro optimalizovaný 100 mA bočník                                     | 73 |

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 9.29 Frekvenční závislost AC-DC difference při optimalizaci 300 mA bočnicku .....           | 74 |
| Obrázek 9.30 Frekvenční závislost fázové chyby při optimalizaci 300 mA bočnicku .....               | 74 |
| Obrázek 9.31 Frekvenční závislost AC-DC difference pro optimalizovaný 300 mA bočnick .....          | 75 |
| Obrázek 9.32 Frekvenční závislost fázové chyby pro optimalizovaný 300 mA bočnick .....              | 75 |
| Obrázek 9.33 Frekvenční závislost AC-DC difference při optimalizaci 1 A bočnicku .....              | 76 |
| Obrázek 9.34 Frekvenční závislost fázové chyby při optimalizaci 1 A bočnicku .....                  | 76 |
| Obrázek 9.35 Frekvenční závislost AC-DC difference pro optimalizovaný 1 A bočnick .....             | 76 |
| Obrázek 9.36 Frekvenční závislost fázové chyby pro optimalizovaný 1 A bočnick .....                 | 77 |
| Obrázek 9.37 Frekvenční závislost AC-DC difference při optimalizaci 10 A bočnicku .....             | 77 |
| Obrázek 9.38 Frekvenční závislost fázové chyby při optimalizaci 10 A bočnicku .....                 | 78 |
| Obrázek 9.39 Frekvenční závislost AC-DC difference optimalizace tloušťky příček 10 A bočnicku ..... | 78 |
| Obrázek 9.40 Frekvenční závislost fázové chyby optimalizace tloušťky příček 10 A bočnicku .....     | 79 |
| Obrázek 9.41 Frekvenční závislost AC-DC difference pro 10 A bočnick s rozměry 1 A bočnicku .....    | 79 |
| Obrázek 9.42 Frekvenční závislost fázové chyby pro 10 A bočnick s rozměry 1 A bočnicku .....        | 79 |
| Obrázek 9.43 Frekvenční závislost AC-DC difference pro optimalizovaný 10 A bočnick .....            | 80 |
| Obrázek 9.44 Frekvenční závislost fázové chyby pro optimalizovaný 10 A bočnick .....                | 80 |
| Obrázek 9.45 Závislost fázové chyby na nominální hodnotě odporu bočnicku při 50 kHz .....           | 81 |
| Obrázek 9.46 Frekvenční závislost AC-DC difference pro návrh 20 A, 50 A a 100 A bočnicků .....      | 82 |
| Obrázek 9.47 Frekvenční závislost fázové chyby pro návrh 20 A, 50 A a 100 A bočnicků .....          | 82 |

## Seznam tabulek

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabulka 2.1 Návaznost pro měření efektivní hodnoty střídavého proudu.....                                            | 3  |
| Tabulka 2.2 Návaznost pro měření elektrického výkonu .....                                                           | 4  |
| Tabulka 3.1 Navržené osazení bočníků .....                                                                           | 14 |
| Tabulka 4.1 CMC pro AC-DC diferenci proudů některých metrologických institutů pro<br>k = 2 .....                     | 18 |
| Tabulka 6.1 Parametry sady vybraných pracovních etalonů .....                                                        | 22 |
| Tabulka 6.2 Typické nejistoty měření DCR vzduchem chlazených etalonů/bočníků ....                                    | 23 |
| Tabulka 6.3 Fázová chyba etalonového foliového bočníku včetně nejistot měření pro<br>k = 2 .....                     | 28 |
| Tabulka 7.1 Naměřené hodnoty TCR a PCR bočníků s nejistotami měření pro k = 2 ...                                    | 30 |
| Tabulka 7.2 Naměřené hodnoty AC-DC difference bočníků včetně nejistot měření pro<br>k = 2 .....                      | 32 |
| Tabulka 7.3 Naměřené hodnoty fázové chyby 10 A bočníku, nejistoty měření pro k = 2<br>.....                          | 32 |
| Tabulka 8.1 Měření relativní permitivity a ztrátového činitele FR4 a měrné vodivosti<br>mědi .....                   | 42 |
| Tabulka 8.2 Výsledky měření rezistorů .....                                                                          | 43 |
| Tabulka 8.3 Parametry N-female konektoru.....                                                                        | 43 |
| Tabulka 8.4 Parametry UHF-female konektoru .....                                                                     | 44 |
| Tabulka 8.5 Parametry vstupní části.....                                                                             | 44 |
| Tabulka 8.6 Parametry příček .....                                                                                   | 45 |
| Tabulka 8.7 Parametry rezistorů .....                                                                                | 46 |
| Tabulka 8.8 Parametry výstupní části .....                                                                           | 46 |
| Tabulka 8.9 Parametry N konektoru .....                                                                              | 47 |
| Tabulka 8.10 Vstupní impedance různých zátěží .....                                                                  | 48 |
| Tabulka 8.11 Vypočtené hodnoty AC-DC difference (ppm).....                                                           | 48 |
| Tabulka 8.12 Vypočtené hodnoty fázové chyby ( $\mu$ rad) .....                                                       | 49 |
| Tabulka 8.13 Intervaly hodnot vstupních veličin s rovnoměrným rozdělením .....                                       | 51 |
| Tabulka 8.14 Vypočtené průměrné hodnoty AC-DC difference a jejich směrodatné<br>odchylky pro zátěž 90 $\Omega$ ..... | 54 |
| Tabulka 8.15 Vypočtené průměrné hodnoty fázové chyby a jejich směrodatné odchylky<br>pro zátěž 50 k $\Omega$ .....   | 54 |
| Tabulka 9.1 Závislost AC-DC difference na změně rozměrů, f = 100 kHz.....                                            | 65 |
| Tabulka 9.2 Závislost fázové chyby na změně rozměrů, f = 100 kHz .....                                               | 66 |
| Tabulka 9.3 Vybrané vysokofrekvenční DPS.....                                                                        | 67 |

# 1. Úvod

Již od nepaměti je lidstvo spjato s potřebou přesného měření různých fyzikálních veličin a to jak v oblasti obchodu a zemědělství, tak později i průmyslu. S rozvojem lidstva docházelo nejen ke zvyšování počtu měřených veličin, ale také k vylepšování dosahovaných přesností při jejich měření.

Postupnou elektrifikací měst a obcí se začalo obchodovat také s elektrickou energií, začaly se vyrábět stroje pracující na elektrický pohon, což ještě více podpořilo využívání elektrické energie, která se tak definitivně stala nedílnou součástí lidského života. S tím souvisel také postupný rozvoj v oblasti měření elektrických veličin. Od jednoduchých analogových ampérmetrů, voltmetrů či wattmetrů s přesností několika procent až po dnešní multifunkční digitální přístroje a zařízení měřící v miliontinách („parts per milion“, ppm).

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.

Tato práce se zabývá problematikou metrologie elektrického proudu z hlediska vývoje nových převodníků pro laboratorní měření proudu v rozsahu 0,01 až 100 A (DC až 100 kHz) a jejich kalibrace. Vychází z požadavků národních metrologických institutů (dále jen NMI) na snížení dosahovaných nejistot měření, frekvenční rozšíření měřených střídavých proudů, dále na minimální fázovou chybu a chybu v amplitudě.

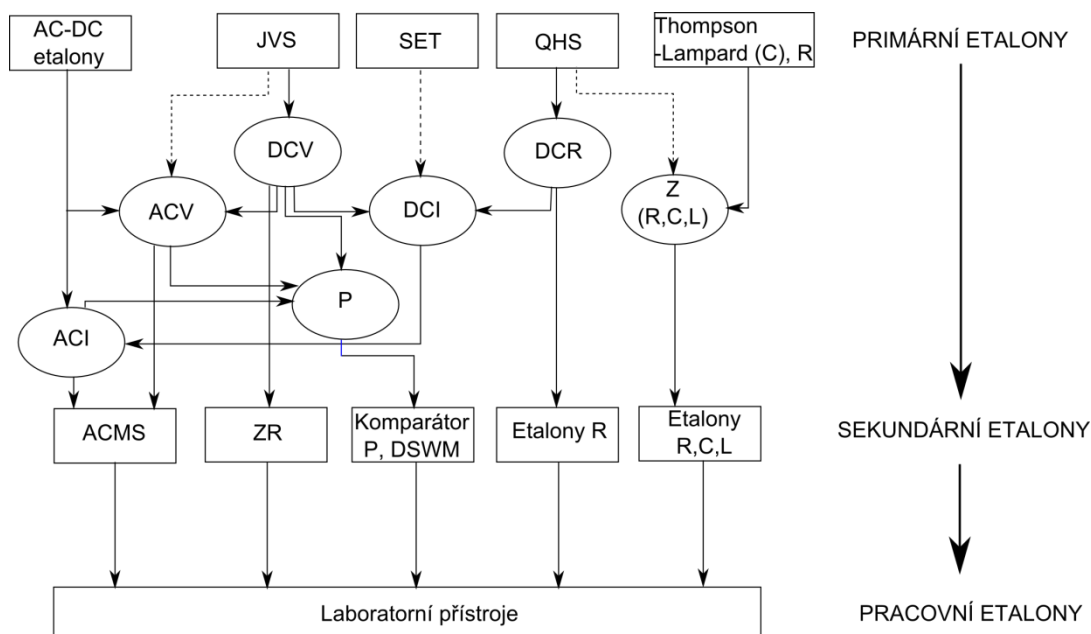
Výsledky disertační práce budou využity k rozvoji etalonáže stejnosměrných a nízkofrekvenčních elektrických veličin v Českém metrologickém institutu v Brně.

## 2. Úvod do metrologie střídavého elektrického proudu

Pod souhrnným pojmem metrologie stejnosměrných a nízkofrekvenčních elektrických veličin se obvykle rozumí tyto oblasti metrologie elektromagnetických veličin:

- metrologie stejnosměrného (DC) napětí, proudu a odporu,
- metrologie AC-DC difference, střídavého (AC) napětí a proudu,
- metrologie impedance,
- metrologie elektrického výkonu, práce a energie.

Na obrázku 2.1 je znázorněno obecné schéma návaznosti stejnosměrných a nízkofrekvenčních elektrických veličin.



**Obrázek 2.1** Obecné schéma návaznosti stejnosměrných a nízkofrekvenčních elektrických veličin (čárkovaně vyznačené návaznosti jsou na experimentální úrovni, ACMS = AC měřicí etalon, ZR = Zenerova reference, DSWM = vzorkovací wattmetr)

Primární etalony nebo jejich kombinace slouží k realizaci jednotek DC napětí (DCV), DC odporu (DCR), DC proudu (DCI), AC napětí (ACV), AC proudu (ACI), výkonu (P) a impedancí (Z, AC, R, L, C). Sestávají ze tří kvantových etalonů (Josephsonův, JVS, Hallův, QHS, a kvantový etalon elektrického proudu – „Single Electron Tunnelling“, SET) a z vypočitatelných etalonů kapacity, AC odporu a AC-DC difference [1], [2], [3].

Kvantové etalony lze rozdělit na etalony, které se již běžně používají jako primární etalony (jedná se o Josephsonův etalon DC napětí a Hallův etalon DC odporu), na etalony, jejichž vývoj již v některých laboratořích NMI pokročil natolik, že je lze již částečně využívat pro navazování jednotek (jedná se o Josephsonův etalon AC napětí a Hallův etalon AC odporu) a na etalony v experimentální fázi (etalon elektrického proudu SET) [1], [3].

Konstrukce vypočitatelného etalonu kapacity vychází z Thompsonova-Lampardova teorému, podle kterého lze spočítat poměr  $\Delta C/\Delta l$ , kde  $\Delta C$  je změna kapacity způsobená změnou vzdálenosti  $\Delta l$  pohyblivé elektrody umístěné mezi čtyřmi symetricky uspořádanými pevnými elektrodami. Vypočitatelné etalony střídavého odporu mají vypočitatelnou AC-DC diferenci odporu a bývají vinuté se symetrickým uspořádáním [1].

AC-DC etalony, tzv. termokonvertory („Thermal Converter“, TC), jsou založeny na přeměně elektrického výkonu vytvářeného na rezistoru v Joulovo teplo [1], [3], [8], [9].

Pomocí primárních etalonů lze tedy přímo realizovat jednotku ACV, ACI, DCV, DCR, C a ACR, kombinací primárního etalonu DCR a DCV lze realizovat jednotku DCI a kombinací primárního etalonu ACV a ACI (případně DCV a času) pak jednotku elektrického výkonu P.

Z primárních etalonů se tyto jednotky přenášejí na sekundární, které slouží k jejich uchovávání a k přenosu na referenční/pracovní etalony používané při běžných kalibracích. Sekundární etalony bývají obvykle již komerčně dostupné přístroje a zařízení s vynikajícími metrologickými parametry pro uchovávání daných jednotek (např. Zenerovy reference pro DC napětí, AC měřicí etalony pro AC napětí a proud) [1], [3].

Dle výše uvedeného se měření AC proudu ubírá ve dvou základních směrech:

- Zajímá nás pouze efektivní hodnota proudu (přenos jednotky na AC měřicí etalony).
- Zajímá nás elektrický výkon, tzn. měření efektivní hodnoty proudu (a napětí) a fázového posunu proudu vůči napětí (přenos jednotky na komparátory výkonu, vzorkovací wattmetry).

V tabulce 2.1 jsou uvedeny úrovně návaznosti pro měření efektivní hodnoty elektrického proudu. Na nejvyšší metrologické úrovni stojí AC-DC difference, jejíž princip vychází z úvahy, že DC a AC napětí a proudy jsou ekvivalentní, když vytvářejí na ideálním rezistoru stejný průměrný elektrický výkon. AC-DC difference je měřena pomocí termokonvertorů. Ty jsou vyráběny pouze pro úzký rozsah měřených proudů, proto pro pokrytí celého měřeného rozsahu proudů se používají v kombinaci s proudovými bočníky, kdy měří jejich normované výstupní napětí [1], [3], [8], [9].

**Tabulka 2.1** Návaznost pro měření efektivní hodnoty střídavého proudu

| Úrovně návaznosti                                          | Používané etalony         | Dosahované nejistoty (10 mA)                     |
|------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------|
| AC-DC difference                                           | termokonvertory s bočníky | řádově od 1 ppm (1 kHz),<br>od 3 ppm (100 kHz)   |
| odvození absolutních hodnot ACI od AC-DC difference a DCI. | AC měřicí etalony         | řádově od 5 ppm (1 kHz),<br>od 10 ppm (10 kHz)   |
| přenos ACI na laboratorní a zákaznické přístroje.          | multimetry a kalibrátory  | řádově od 15 ppm (1 kHz),<br>od 150 ppm (10 kHz) |

AC měřicí etalony („AC Measurement Standards“, ACMS) jsou voltmetry, které obvykle měří jen ACV a ACI (popř. i AC-DC diferenci) a to s vysokou přesností. ACV, ACI (i AC-DC) kalibrace těchto etalonů se děje pomocí AC-DC etalonů. Pro ACV, ACI kalibraci je nutná znalost i DCV a DCI hodnot. [5], [6], [7].

Jako laboratorní přístroje se obvykle používají kalibrátory, které mají rozsah do 2 A (s transkonduktančním zesilovačem do 20 A). Kalibrace ACI se děje porovnáním s ACMS. Laboratorní multimetry jsou většinou kalibrovány pomocí kalibrátorů. Kalibrátory a laboratorní multimetry pak slouží ke kalibraci zákaznických měřidel [2], [4], [5].

Návaznost elektrického výkonu (viz tabulka 2.2) vychází ze dvou různých principů a to buď z AC-DC difference anebo z využití vzorkování (návaznost na DCV a čas).

Výkonové komparátory využívají principu AC-DC difference, díky tomu mají velmi dobrou dlouhodobou stabilitu. Nevýhodou je poměrně omezený rozsah měřených frekvencí (obvykle pouze síťové frekvence). Komparátory měří napětí, proud, činný, jalový, zdánlivý výkon, fáze, účinník, frekvenci. Slouží především pro kalibrace etalonových elektroměrů [1], [3].

Vzorkovací wattmetry pracují se synchronním vzorkováním ACV a ACI signálu, jejichž velikost je normována pomocí převodníků (napětíové děliče, bočníky). Vzorkovací frekvence se pohybuje od 150 kHz. Tím je možné je použít pro měření v širším frekvenčním rozsahu, což dává možnost měření různých parametrů spojených s kvalitou elektrické energie. Vzorkovací wattmetry se tak používají zejména pro kalibrace kalibrátorů výkonu. [3], [48]

Elektroměrné stanice slouží k ověřování elektroměrů. Jejich jádrem je etalonový elektroměr a výkonový zdroj. Kalibrátor výkonu je multifunkční třífázový výkonový zdroj, který se používá pro kalibraci měřidel kvality elektrické energie, výkonových analyzátorů apod. [3].

**Tabulka 2.2** Ná vaznost pro měření elektrického výkonu (TP = třída přesnosti)

| Úrovně návaznosti                                | Používané etalony                                                               | Dosahované nejistoty (50 Hz, účinník = 1) |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| AC-DC difference + DCV<br>DCV + čas (vzorkování) | výkonové komparátory,<br>vzorkovací wattmetry<br>s napětíovými děliči a bočníky | od 0,01 %<br>od 0,001 %                   |
| přenos na laboratorní<br>přístroje               | etalonové elektroměry<br>(elektroměrné stanice),<br>kalibrátory výkonu          | ~ 0,05 %<br>od 0,02 %                     |
| přenos na zákaznické<br>přístroje                | elektroměry,<br>kvalimetry                                                      | TP 0,2 %; 0,5 %; 1 %; 2 %                 |

Součástí metrologie elektrického výkonu a práce je také problematika měření vysokých napětí a proudů, která se zabývá především zařízeními umístěnými v elektrických rozvodných sítích, jako jsou např. měřicí transformátory proudu a napětí, kapacitní děliče napětí aj.

K tomu slouží etalonové měřicí transformátory, které bývají obvykle navrženy na konkrétní hodnoty proudů a využívají se především k uchovávání proudových či napětíových poměrů s nejistotami v řádu jednotek ppm na výkonových frekvencích. Pro proudy od 100 A se ke kalibraci proudových transformátorů používají také tzv. Rogowského cívky [1], [3].

Rogowského cívky i měřicí transformátory proudu lze obecně také považovat za převodníky pro měření proudu, které v případě Rogowského cívek převádí měřený proud na normované výstupní napětí a v případě měřicích transformátorů je normovaným výstupem opět proud. Protože jsou využívány pro kalibraci síťových zařízení, je třeba kromě dělicího poměru zjišťovat také jejich fázovou chybu.

### 3. Převodníky pro měření elektrického proudu

Z výše uvedeného přehledu vyplývá, že jádrem každého měřicího systému, jehož součástí je měření elektrického proudu, je obecně převodník, který převádí měřený proud na normovanou výstupní veličinu, kterou bývá obvykle napětí. Při měření elektrického výkonu je třeba kromě dělicího poměru znát také fázovou chybu použitého převodníku.

Střídavý proud je definován jako efektivní hodnota signálu:

$$I_{AC} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \{I(t)\}^2 dt}. \quad (3.1)$$

V národních metrologických institutech (NMI) se používají následující základní typy převodníků pro měření proudu:

- termokonvertory,
- proudové bočníky,
- Rogowského cívky,
- měřicí transformátory.

Dále následuje stručný popis těchto převodníků. Větší prostor je věnován pouze proudovým bočníkům, kterými se disertační práce zabývá.

#### 3.1 Termokonvertory

Na základě definice (3.1) je možné porovnávat velikost střídavého a stejnosměrného proudu prostřednictvím elektrického výkonu ztraceného na odporovém elementu, kdy lze vyjít z úvahy, že stejnosměrný a střídavý proud jsou ekvivalentní, pokud vytvářejí na ideálním rezistoru stejný průměrný elektrický výkon. Elektrický výkon vytvářený na rezistoru se zcela přeměňuje na Joulovo teplo. To obvykle měří senzory (termočlánky), jejichž vstupy reagují přímo na teplotu a jejichž výstupy dávají DC napětí, které je úměrné uvolněnému teplu. Tento princip vedl ke vzniku tzv. tepelných převodníků (termokonvertorů), které obsahují jak rezistor („heater“), tak i termočlánek. Pokud by na vstup ideálního termokonvertoru byly přivedeny střídavý a stejnosměrný proud stejného výkonu, výstupní napětí termočlánu by bylo stejně velké pro oba proudy. Nicméně v případě reálného termokonvertoru jsou výstupní napětí termočlánu ovlivněny tepelnými ztrátami a frekvenční charakteristikou odporového elementu [8], [9], [11].

Na základě výstupního napětí termokonvertoru lze tedy stanovit míru ekvivalentnosti AC a DC napětí (proudu) na rezistoru pomocí tzv. AC-DC difference  $\delta_{AC-DC}$ , která je definována následující rovnicí [8], [9]:

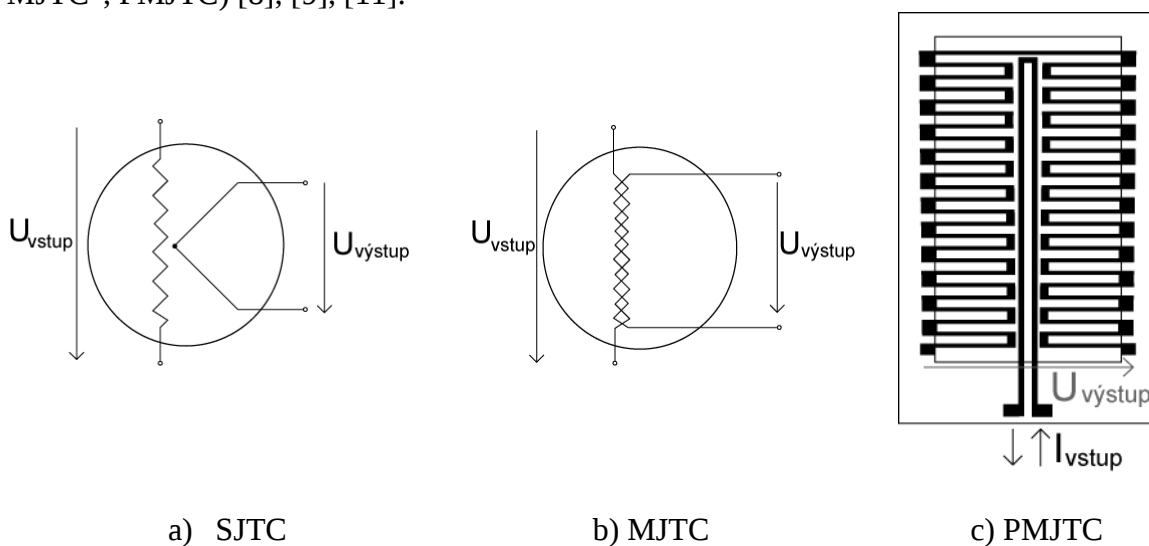
$$\delta_{AC-DC} = \frac{U_{oac} - U_{odc}}{nU_{odc}}, \quad (3.2)$$

kde  $U_{odc}$  je aritmetický průměr hodnoty výstupního napětí termokonvertoru při kladné a záporné polaritě vstupního DC proudu,  $U_{oac}$  je hodnota výstupního napětí termokonvertoru při vstupním AC proudu,  $n$  je tzv. mocniný koeficient použitého termokonvertoru, který reprezentuje jeho převodní charakteristiku.

Výhodou termokonvertorů je velmi vysoká dlouhodobá stabilita (rekalibrace až po deseti letech), nevýhodou, že jsou samostatně použitelné pouze pro velmi malý napěťový či proudový rozsah (často např. 100 mV až 1 V, 3 až 10 mA). Proto se obvykle používají jako referenční etalony pro uchovávání hodnoty základní úrovně napětí či proudu, z níž se poté odvozuje stupnice [8], [9], [11].

Další nevýhodou je poměrně zdoluhavé měření, kdy se termokonvertor nejprve musí stabilizovat na měřené napěťové (proudové) úrovni (řádově nad 100 min.) a poté je zahájeno měření AC-DC difference (přepínání mezi AC a DC napětím/proudem po cca 40 s až 60 s) [8], [9].

Postupně byly vyvinuty tři typy termokonvertorů, které umožňují realizaci AC-DC porovnávacího etalonu na ppm úrovni. Jsou to jednopřechodové termokonvertory („Single-Junction Thermal Converter“, SJTC), mnohapřechodové termokonvertory („Multijunction thermal converter“, MJTC), planární mnohapřechodové termokonvertory („planar-type MJTC“, PMJTC) [8], [9], [11].



Obrázek 3.1 Termokonvertory

Jednopřechodové termokonvertory (SJTC) byly vyvinuty v padesátých letech 20. století. Tepelné kontakty termočlánku jsou spojeny s odporovým elementem v jeho středu pomocí kapkového spoje (tzv. „bead“) vyrobeného z elektricky izolujícího materiálu jako sklo nebo keramika (viz obrázek 3.1a). Výstupní napětí narůstá přibližně s druhou mocninou napětí vstupního a mívá velmi nízkou hodnotu, obvykle 1,75 mV až 7 mV pro 50 % až 100 % plného rozsahu vstupu. Vakuové termočlánky mají několik nevýhod. Je to především nízké výstupní napětí, velká časová konstanta a náchylnost k poškození při přetížení. Mají velmi dobrou dlouhodobou stabilitu a jsou stále hodně využívány [8], [9], [11].

Mnohapřechodové termokonvertory (MJTC) byly vyvinuty v sedmdesátých a osmdesátých letech 20. století. MJTCs jsou navrženy tak, aby byl omezen termoelektrický jev, který je hlavní příčinou AC-DC difference okolo 1 kHz. MJTC má jediné žhavicí vlákno (obvykle kroucené bifilární), jehož teplo je snímáno řadou sériově zapojených termočlánků (viz obrázek 3.1b). Díky rovnoměrnému teplotnímu rozložení dochází k redukci termoelektrického jevu podél žhavicího vlákna a může být dosaženo AC-DC diferencí lepších

než 0,1 ppm. Další výhodou je nárůst velikosti výstupního napětí (asi 100 mV na plném vstupním rozsahu). Nevýhody MJTC vyplývají z jejich komplexí struktury. MJTC mají větší frekvenční závislost, sklon k elektrostatickému proražení a jsou nevhodné pro sériovou výrobu [8], [9], [11].

Dalším typem jsou tzv. *planární mnohapřechodové termokonvertory* (PMJTC) vyvinuté pomocí technologie integrovaných obvodů (viz obrázek 3.1c) k omezení parazitních vlastností žhavicího vlákna. Další výhodou PMJTC je jejich vhodnost k sériové výrobě, díky tomu jsou velice rozšířeny v laboratořích NMI [8], [9], [11], [12], [13], [14], [15], [18].

Firma Fluke vyvinula tzv. *polovodičový logaritmický termokonvertor*, který využívá teplotní závislosti přechodu báze-emitor u tranzistoru. Díky tomu je měření s ním rychlejší (stabilizace na zvoleném rozsahu 15 až 20 min., přepínání mezi AC a DC napětím/proudem po cca 20 s až 30 s). To je však vykoupeno horší dlouhodobou stabilitou [9], [10].

Termokonvertory s vypočitatelnou frekvenční charakteristikou slouží v NMI jako primární etalony AC-DC difference proudů. V některých NMI přistoupili k realizaci primárního etalonu AC-DC difference proudů na 10 mA použitím dostupných jedno přechodových termokonvertorů SJTC, ke kterým vyvinuli jednoduché RLC modely [16], [17], [18]. V britském NMI (NPL) byl vyroben mnohapřechodový termokonvertor s bifilárním vyhřívaným odporovým elementem, ke kterému byl vytvořen také jeho teoretický model [19]. Modely mnohapřechodových termokonvertorů vyvinutých v německém NMI (PTB) byly předmětem disertačních prací [20], [21]. Nejnovějším z těchto termokonvertorů je tzv. quartz-PMJTC, který v současné době slouží jako primární etalon AC-DC difference proudu v PTB pro 10 mA až do 1 MHz. Publikované nejistoty tohoto modelu jsou méně než 1 ppm do 100 kHz a až 5 ppm na 1 MHz (pro  $k = 1$ ) [22].

## 3.2 Proudové bočníky

Proudový bočník je velmi rozšířeným pasivním převodníkem pro měření proudu. Jako proudový bočník se označuje rezistor, kterým prochází měřený proud a vytváří se tak na něm napětí. Měření proudu je tak převedeno na měření úbytku napětí na rezistoru.

Nespornou výhodou tohoto typu etalonu je jistě možnost převedení širokého rozsahu proudů na snadno měřitelnou (normovanou) úroveň napětí (nejpřesněji od 0,5 až 1 V) a větší odolnost proti přetížení. Nevýhodami jsou frekvenční závislost odporu a fázové chyby bočníku.

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  $\mu$ rad) [23].

Základní princip konstrukce těchto speciálních bočníků vychází z koaxiální konstrukce. V podstatě je lze rozlišit na dva typy a to foliové bočníky („foil shunt“) [33] nebo klecové bočníky („cage shunt“) [24], [27], [28], [29], [30].

Vlastnosti obou typů bočníků záleží na použitých materiálech a součástkách. Obvyklými požadavky bývají malý výkonový koeficient odporu, teplotní koeficient odporu, frekvenční závislost odporu i fázová chyba. Obecně lze říci, že klecové bočníky mívají menší výkonový i teplotní koeficient než foliové, naopak foliové bočníky vynikají menší frekvenční závislostí a fázovou chybou [23].

## 3.2.1 Klecové bočníky

### 3.2.1.1 Princip konstrukce

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.

Prostorové upořádání klecových bočníků vychází ze symetrického rozložení paralelně spojených rezistorů. Symetrické rozložení bývá jak kruhové [24], [29], [52], tak čtvercové [28]. Pro proudy menší než 10 mA obvykle není třeba dělení do více větví.

### 3.2.1.2 Konstrukce existujících bočníků a jejich modelování

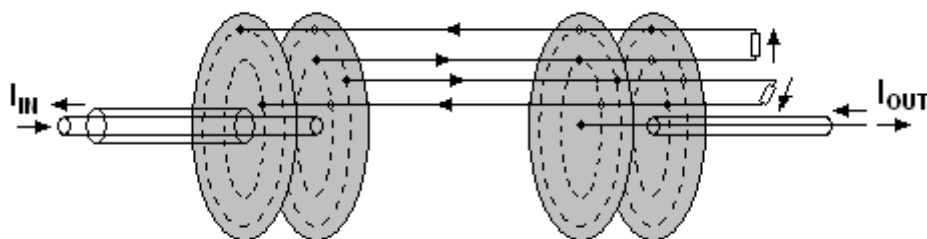
Pro vlastní konstrukci se obvykle využívají jednostranné a oboustranné desky plošných spojů (DPS) a precizní rezistory typu BMF („Bulk Metal Foil“) nebo také SMD rezistory typu MELF („Metal Electrode Face Bonding“). Z desek plošných spojů s precizními rezistory byly tyto bočníky zkonstruovány např. v NMI Austrálie (NMIA) [16], ČR (ČMI) [24], [25], Švédska (SP) [27], [52] nebo Norsku (JV) [28] či Finsku (MIKES) [29].

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

#### 3.2.1.2.1 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 20 A bočníku s výstupním napětím 1,5 V) pro použití zejména s planárními termokonvertory  $193 \text{ } \Omega/2 \text{ V}$  nebo s multimetrem (DMM) [29].

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 3.2) [29].

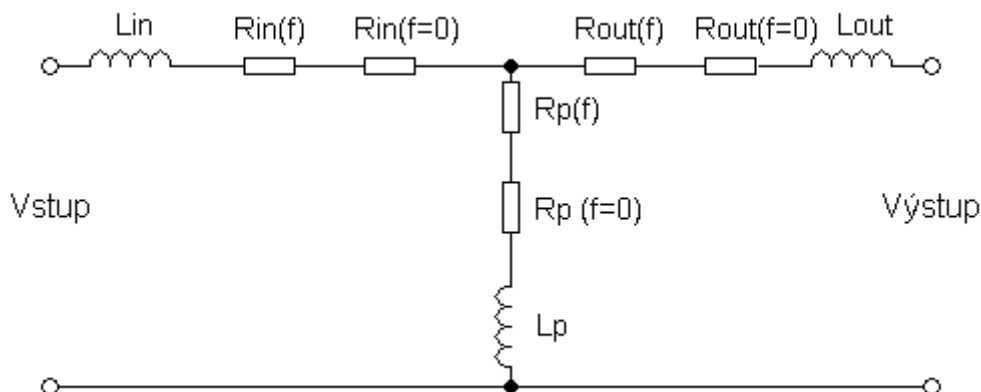


**Obrázek 3.2** Konstrukce bočníků MIKES s opačným směrem proudu v navzájem sousedních rezistorech [29]

K těmto bočníkům byl zvolen T model uvedený na obrázku 3.3, který sestává z tří částí [29]:

- Vstupní větev, která přímo neovlivňuje měření, ale vyžaduje větší vstupní napětí a tak by mohla způsobit přetížení generátoru proudu, pokud by byl překročen jeho maximální přípustný úbytek napětí.

- Paralelní větev, ve které procházející proud způsobuje úbytek napětí, který je měřen.
- Výstupní větev, která ovlivňuje měření pouze, pokud je zatížen výstup bočníku.



Obrázek 3.3 T model bočníků MIKES [29]

Všechny složky modelu byly počítány ze série těchto pěti měření [29]:

- měření přenosové (vstupně výstupní) impedance,
- měření vstupní impedance při otevřeném výstupu,
- měření vstupní impedance při zkratovaném výstupu,
- měření výstupní impedance při otevřeném vstupu,
- měření výstupní impedance při zkratovaném vstupu.

U všech bočníků pak byla zkalibrována jejich AC-DC difference [29], bohužel porovnání naměřených výsledků s výše uvedeným modelem nebylo již publikováno. Stejně tak analýza fázové chyby nebyla publikována.

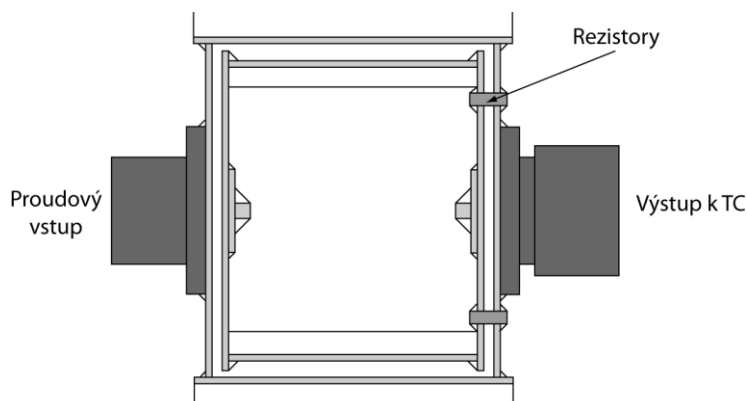
#### 3.2.1.2.2 Klecové bočníky JV

V norském NMI byla vyvinuta sada bočníku pokrývající rozsah 30 mA až 10 A, 10 Hz až 100 kHz pro použití zejména s termokonvertory [28]. Základními požadavky pro jejich konstrukci byly [28]:

- minimální kapacita pro bočníky na malé proudy,
- minimální indukčnost pro bočníky na velké proudy,
- koaxiální struktura (nebo struktura co nejbližší koaxiální),
- co nejlepší odvod tepla z odporového elementu na povrch stínění,
- velká povrchová plocha pro efektivní odvod tepla,
- levné komponenty,
- jednoduchá výroba,
- co nejmenší vliv skin efektu.

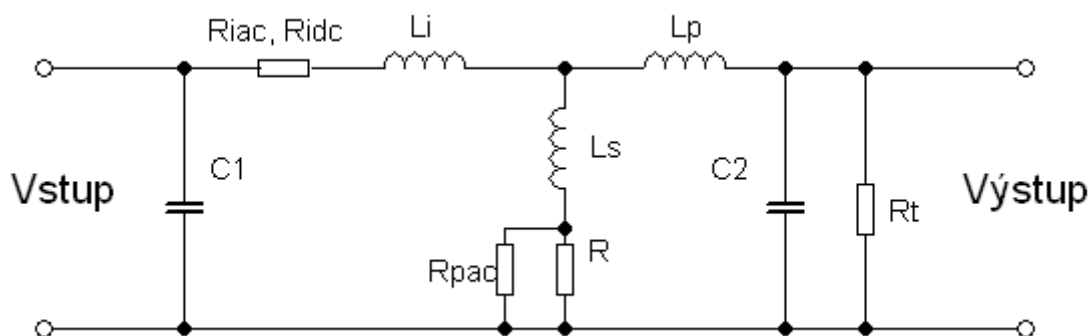
Konstrukce bočníků je naznačena na obrázku 3.4. Byla zvolena symetrická konstrukce tvaru čtverce s SMD rezistory typu MELF osazenými mezi dvěma oboustrannými deskami a

připájenými k Cu vrstvám na obou stranách. Výstupní napětí je pak měřeno ze středu čtverce s rezistory [28].



Obrázek 3.4 Konstrukce bočnicků JV [28]

K bočníkům byl sestaven model zobrazený na obrázku 3.5.  $R$  reprezentuje odpor bočnicku,  $L_s$  sériovou indukčnost rezistoru bočnicku.  $L_p$  a  $C_2$  jsou sériová indukčnost a paralelní kapacita výstupní části bočnicku.  $R_{pac}$  je paralelní odpor způsobený dielektrickými ztrátami.  $L_1$  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 [28].



Obrázek 3.5 Model bočnicků JV [28]

AC-DC difference bočnicku je definovaná jako:

$$\delta = \frac{|I_{AC}| - I_{DC}}{I_{DC}}, \quad (3.3)$$

kde  $I_{DC}$  je stejnosměrný proud procházející bočníkem a  $I_{AC}$  je efektivní hodnota střídavého proudu procházejícího bočníkem, která způsobuje stejné výstupní napětí na termokonvertoru  $U_{tDC}$ . Dle modelu lze stejnosměrný proud vyjádřit jako [28]:

$$I_{DC} = \frac{U_{tDC}}{\frac{R_t R}{R_t + R}}. \quad (3.4)$$

Střídavý proud může být vyjádřen pomocí rovnice [28]:

$$I_{AC} = \frac{Z_3 Z_5}{Z_2 Z_4 Z_6} U_{tDC}, \quad (3.5)$$

kde

$$Z_2 = \frac{R_t \frac{1}{j\omega C_2}}{R_t + \frac{1}{j\omega C_2}}, \quad (3.6)$$

$$Z_3 = \frac{R_t \frac{1}{j\omega C_2}}{R_t + \frac{1}{j\omega C_2}} + j\omega L_p, \quad (3.7)$$

$$Z_4 = \frac{\frac{RR_{pac}}{R+R_{pac}} + j\omega L_s}{Z_2 + \frac{RR_{pac}}{R+R_{pac}} + j\omega L_s}, \quad (3.8)$$

$$Z_5 = Z_4 + R_{iac} + j\omega L_i, \quad (3.9)$$

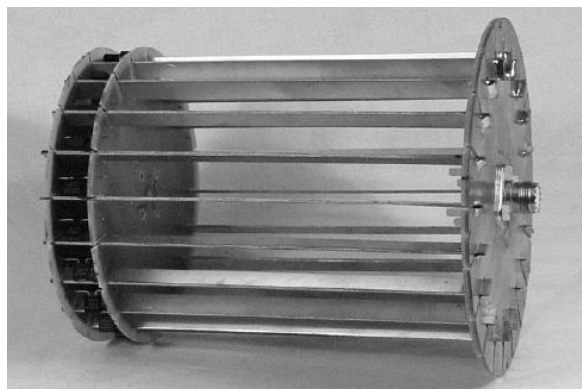
$$Z_6 = \frac{(Z_4 + R_{iac} + j\omega L_i) \frac{1}{j\omega C_1}}{Z_4 + R_{iac} + j\omega L_i + \frac{1}{j\omega C_1}}. \quad (3.10)$$

Takto spočítaná AC-DC difference 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 300 mA bočníku v SP a dvou celých sad v PTB. Hodnoty pro 300 mA bočník byly vypočtené až do 1 MHz, kde se ukázala shoda s měřeními v SP a PTB lepší než 10 ppm [28]. Fázová chyba bočníků analyzovaná modelem ale publikována nebyla.

### 3.2.1.2.3 Klecové bočníky SP

Pracovníci švédského NMI (SP) navrhli sadu klecových bočníků pro široké spektrum použití: od měření AC-DC difference, výkonu a impedance až po měření proudových transformátorů [52].

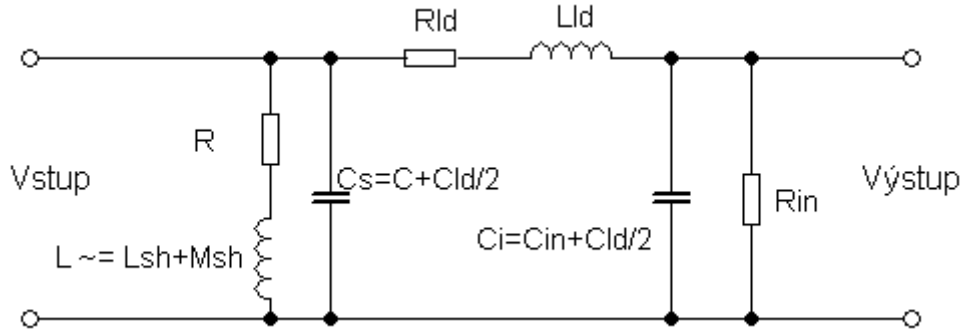
Konstrukce bočníků je zobrazena na obrázku 3.6. Podobně jako u konstrukce MIKESu byla zvolena symetrická kruhová konstrukce s paralelně spojenými rezistory fy. Vishay typu S102 osazenými na příčkách mezi dvěma DPS deskami, které průměrují napětí na rezistorech a jsou spojeny s výstupním konektorem. Příčky jsou z oboustranné DPS a slouží k přívodu a odvodu měřeného proudu [52].



Obrázek 3.6 Konstrukce bočníků SP [52]

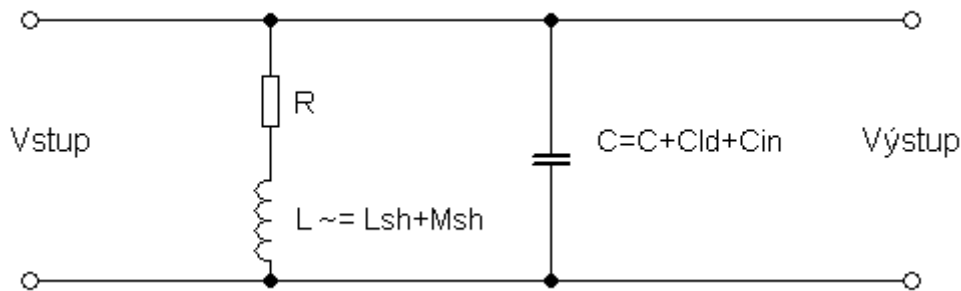
Model SP bočníku se zátěží je uveden na obrázku 3.7 [26]. Na tomto schématu představuje  $R$  odpor,  $C$  kapacitu a  $L$  indukčnost bočníku.  $L_{ld}$ ,  $C_{ld}$  a  $R_{ld}$  představuje indukčnost, kapacitu a odpor přívodních kabelů a  $C_{in}$  a  $R_{in}$  pak vstupní impedanci zátěže. Celková impedance je pak dána vztahem [26]:

$$Z = R \left( 1 - \frac{R+R_{ld}}{R_{in}} \right) + j\omega \left( L - R^2(C_s + C_i) - R \frac{L+L_{ld}}{R_{in}} - RR_{ld}C_i \right). \quad (3.11)$$



Obrázek 3.7 Model bočníků SP [26]

Pokud platí, že  $R_{in} \gg R \gg R_{ld}$ ,  $C_s \gg C_i$  lze použít jednodušší model na obrázku 3.8 [26].



Obrázek 3.8 Zjednodušené náhradní schéma bočníku [26]

Pro celkovou impedanci pak platí (za předpokladu  $\omega C \ll R$ ,  $\omega L \ll R$ ) [26]:

$$Z = R + j\omega(L - R^2C) = R + j\omega L_{eq}. \quad (3.12)$$

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  $\tan^{-1}(\omega L/R)$  [26]. Výpočty AC-DC difference na základě modelování publikovány nebyly.

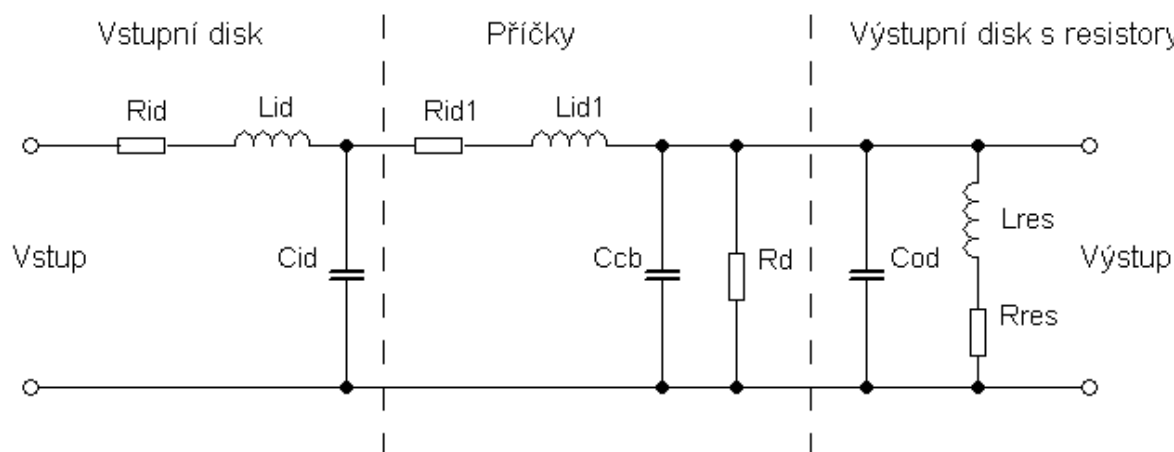
#### 3.2.1.2.4 Klecové bočníky SIQ

Ve slovinském NMI (SIQ) vyvinuli sadu 14 bočníků pokrývajících rozsah od 100  $\mu A$  až do 20 A s pozdějším rozšířením až do 100 A. Konstrukce je analogická ke konstrukci bočníků SP (viz obrázek 3.9) [30].



Obrázek 3.9 Konstrukce bočnicků SIQ [32]

Na rozdíl od pracovníků SP se v SIQ zaměřili na tvorbu modelu těchto bočnicků pro výpočet AC-DC difference. Výsledný model je ukázán na obrázku 3.10. Sestává ze tří částí modelujících vstupní disk, příčky a rezistory s výstupním diskem [31].



Obrázek 3.10 Model bočnicků SIQ [31]

Přenosová funkce byla spočítána jako [31]:

$$\frac{I_{in}}{U_{out}} = \frac{1+j\omega(C_{cb}+C_{od})Z_{res}}{Z_{res}(1-j\omega C_{id}Z_1)}, \quad (3.13)$$

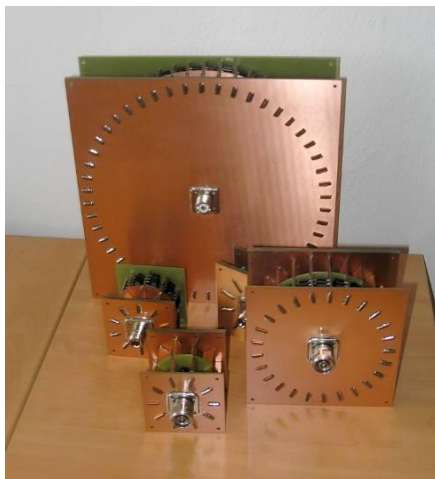
kde  $Z_1$  je impedance příček a výstupní části a  $Z_{res}$  impedance vodivosti  $R_d$  a rezistorů. R, L, C parametry jednotlivých dílů byly změřeny impedančním analyzátozem anebo kde byla konstrukce dostatečně intuitivní, tak i spočítány. Spočítána byla kapacita vstupního disku, příček i výstupního 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 [31]. Fázová chyba bočnicků však nebyla analyzována.

### 3.2.1.2.5 Klecové bočníky ČMI

V ČMI byla postavena sada bočnicků pokrývající rozsah od 30 mA až do 10 A. Hlavními kritérii návrhu bylo využití bočnicků pro odvození stupnice AC-DC difference proudů s co nejmenším počtem kroků ve frekvenčním rozsahu 10 Hz až 100 kHz [24], [25].

Pro krokování stupnice AC-DC difference proudů se předpokládalo využití planárních termokonvertorů s parametry 10 mA/1 V/90  $\Omega$ . 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) [25].

Zvolena byla konstrukce analogická ke konstrukci bočníků SP a SIQ (viz obrázek 3.11) s tím rozdílem, že délka příček byla značně redukována, což vedlo ke snížení kapacity bočníků. [24], [25].



**Obrázek 3.11** Konstrukce bočníků ČMI [24]

Navržené parametry pro jednotlivé bočníky ukazuje tabulka 3.1. Pro návrh bočníku 30 mA bylo již nutné uvažovat odpor termokonvertoru 90  $\Omega$ . Proto byl zvolen odpor bočníku 50  $\Omega$  sestávající ze tří 150  $\Omega$  rezistorů typu Z201, fy.Vishay. Typ Z201 je rezistor s teplotním koeficientem menším než 1 ppm/°C pro hodnoty odporu nad 100  $\Omega$ . Ostatní bočníky byly osazeny rezistory typu S102C,K firmy Vishay, jejichž teplotní koeficient je menší než 2 ppm/°C. Zároveň vnitřní konstrukce zvolených rezistorů zajistila velmi malou indukčnost [25].

**Tabulka 3.1** Navržené osazení bočníků [24], [25]

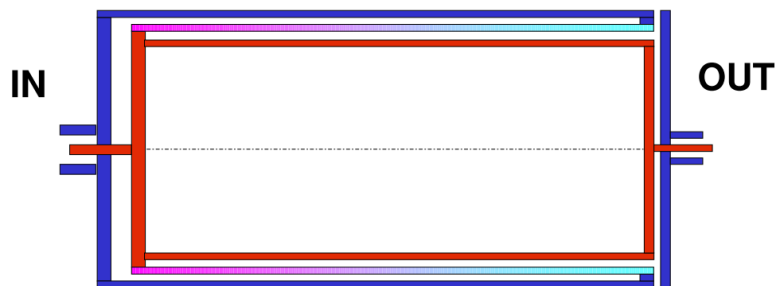
| Jmenovitý proud | Jmenovité napětí        | Odpor bočníku                                    | Počet a hodnota rezistorů | Typ rezistorů             |
|-----------------|-------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 30 mA           | 1,5 V,<br>pro PMJTC 1 V | 50 $\Omega$ ,<br>v kombinaci s PMJTC 32 $\Omega$ | 3 x 150 $\Omega$          | 3 x Z201                  |
| 100 mA          | 1 V,<br>pro PMJTC 0,9 V | 10 $\Omega$ , v kombinaci s PMJTC 9 $\Omega$     | 10 x 100 $\Omega$         | 3 x S102C,<br>7 x S102K   |
| 300 mA          | 1 V                     | 3,3 $\Omega$                                     | 30 x 100 $\Omega$         | 10 x S102C,<br>20 x S102K |
| 1 A             | 1 V                     | 1 $\Omega$                                       | 100 x 100 $\Omega$        | 33 x S102C,<br>67 x S102K |
| 10 A            | 1 V                     | 0,1 $\Omega$                                     | 100 x 10 $\Omega$         | 33 x S102C,<br>67 x S102K |

K bočníkům nebyl vytvořen žádný model, pouze byl kalibrován jejich stejnosměrný odpor a AC-DC difference [24].

## 3.2.2 Foliové bočníky

### 3.2.2.1 Princip konstrukce

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 [34]. Prostorové uspořádání těchto bočníků je naznačeno na obrázku 3.12. Modrá a černá barva reprezentuje vodivé folie, duhová pak odporovou [34].



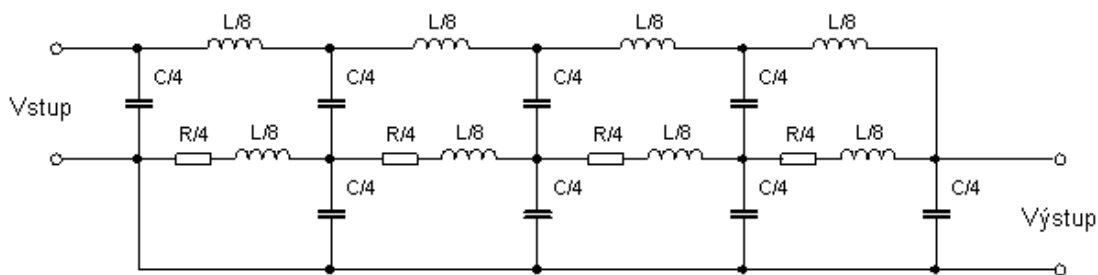
Obrázek 3.12 Proudový foliový bočník [34]



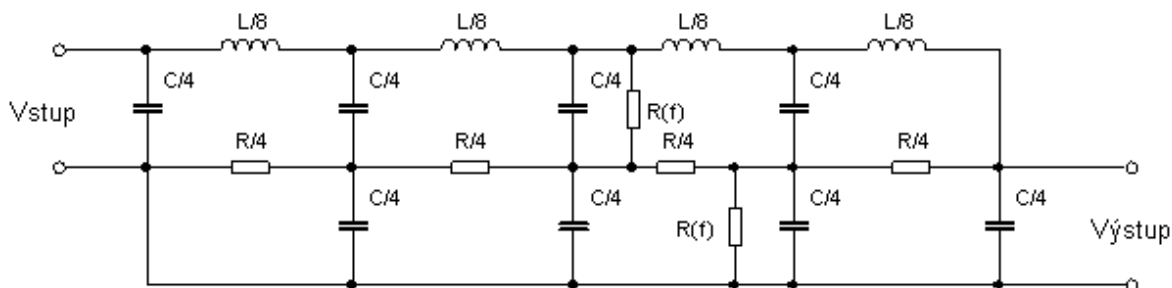
Obrázek 3.13 Konstrukce foliových bočníků BEV [35]

### 3.2.2.2 Modelování

Tvorba modelů k foliovým bočníkům je poměrně náročná. Pracovníci BEV publikovali nejprve model s rozptřeny parametry uvedený na obrázku 3.14. Shoda vypočtených AC-DC diferencí bočníků podle tohoto modelu s naměřenými však byla na frekvencích vyšších 10 kHz v řádu desítek ppm [34]. 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 3.15 [36]. Výpočet AC-DC difference bočníků podle toho modelu se shoduje s naměřenými hodnotami do 5 ppm. Nicméně pro analýzu fázové chyby se jeví jako nevhodný [36].



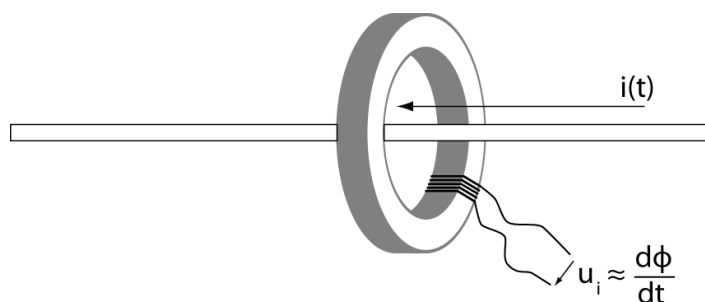
Obrázek 3.14 Zjednodušený model foliového bočníku BEV [34]



Obrázek 3.15 Upravený model foliového bočnicku BEV [36]

### 3.3 Rogowského cívky

Rogowského (toroidní vzduchová) cívka využívá podobného principu jako měřicí transformátor (indukované napětí ve vodiči cívky). Magnetizační charakteristika je však v širokém proudovém rozsahu lineární – běžně od jednotek ampér po stovky kiloampér [37]. Frekvenční omezení měřeného střídavého proudu je shora dáno vlastní rezonancí cívky (vhodnou konstrukcí lze teoreticky dosáhnout použití i do 1 MHz), nicméně oblast běžného použití se pohybuje na výkonových frekvencích. Díky zmíněným velmi výhodným vlastnostem zažívají v posledních letech Rogowského cívky veliký vzestup.



Obrázek 3.16 Princip Rogowského cívky

Bylo vyvinuto několik systémů pro měření velkých střídavých proudů využívajících Rogowského cívky např. ve finském NMI (MIKES) [38] nebo přehledově v [39]. Rogowského cívek se využívá např. ke kalibraci průmyslových měřicích transformátorů proudu na výkonových frekvencích v nejistotách pod 100 ppm pro kalibraci poměru a pod 100  $\mu$ rad pro měření chyby fáze [40].

Kalibrace Rogowského cívek je zpravidla prováděna pomocí bočnicku na proudech v řádu jednotek ampér s nejistotou pod 100 ppm a poté pro velké proudy se využívá jejich dobré linearity [38]. V kanadském NMI (NRC) byl sestaven systém pro kalibraci Rogowského cívek založený na použití speciálních měřicích transformátorů a vzorkovacího multimetru s nejistotou pod 100 ppm [41].

### 3.4 Měřicí transformátory

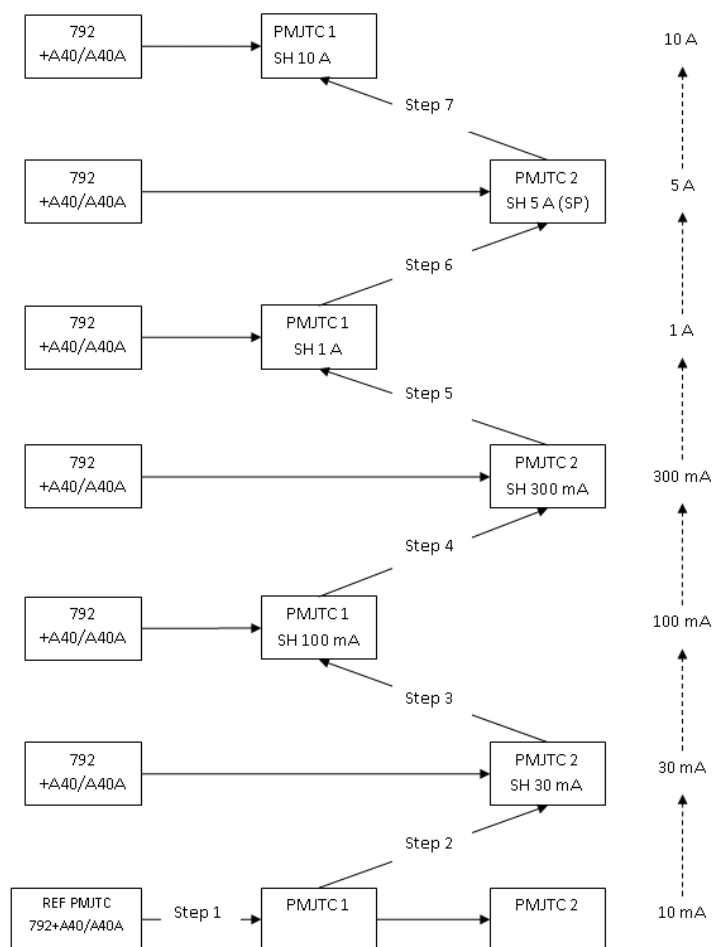
Pro měření proudů desítek ampér a větších lze použít také měřicí transformátory proudu. Díky nasycení magnetizačního obvodu mají bohužel ve velkém rozsahu výrazně nelineární magnetizační charakteristiku. Bývají tedy obvykle navrženy na konkrétní hodnoty proudů. V primární metrologii se využívají především k velmi přesnému uchovávání proudových poměrů („current ratio“) s nejistotami v řádu jednotek ppm na výkonových frekvencích [42],[43]. Objevuje se však snaha i o frekvenční rozšiřování, např. v [44] jednostupňový transformátor do 100 kHz.

## 4. Měřicí systémy střídavého proudu

### 4.1 Systémy pro měření efektivní hodnoty proudu

Na primární úrovni se efektivní hodnota střídavých proudů odvozuje zatím výhradně od AC-DC difference [1], [3].

Tvorba stupnice AC proudu probíhá tzv. krokováním (stepováním) nahoru. Vychází se ze jmenovitého proudu (obvykle 10 mA) referenčního termokonvertoru o známých AC-DC diferencích, z něhož se pak krokováním nahoru odvodí celá střídavá stupnice. Krokování sestává z kalibrací jednoho etalonu po druhém („one after the other“), kdy je nezkalibrovaný etalon porovnáván se sousedním, již zkalibrovaným. Předpokládá se, že AC-DC difference každého etalonu zůstává konstantní mezi nižší úrovní proudu, na které je porovnáván s referenčním etalonem, a plným rozsahem, na kterém je potom použit jako referenční etalon v dalším kroku. Nejjednodušší možné krokování, při kterém je potřeba pouze tři termokonvertorů, je uvedeno na obrázku 4.1. Etalony pro krokování bývají tvořeny planárními termokonvertory v kombinaci s bočníky. Stupnice se obvykle zároveň přenáší na termokonvertor FLUKE 792A, který se používá k dalším měřením [45], [46], [47].



Obrázek 4.1 Možný průběh krokování pro odvození stupnice

Tyto systémy obvykle měří přímo rozdíl AC-DC diferencí  $\delta_{\text{meas}}$  kalibrovaného a referenčního etalonu. Výslednou AC-DC diferencí kalibrovaného etalonu  $\delta_{\text{dut}}$  lze pak jednoduše získat dle vztahu:

$$\delta_{\text{dut}} = \delta_{\text{meas}} + \delta_{\text{ref}}, \quad (4.1)$$

kde  $\delta_{\text{ref}}$  je AC-DC difference referenčního etalonu známá z předchozího kroku [46], [47].

Vzhledem k tomu, že tento měřicí systém je již poměrně rozšířen, lze pro představu, jakých nejistot je možné při tvorbě stupnice proudů dosahovat, použít kalibrační a měřicí schopnosti („Calibration and measurement capabilities“, CMC) AC-DC difference proudů jednotlivých NMI. V tabulce 4.1 jsou uvedeny CMC vybraných NMI pro vybrané hodnoty proudu a frekvenční body.

**Tabulka 4.1** CMC pro AC-DC diferencí proudů některých metrologických institutů pro  $k = 2$  [48]

| Proud  | NMI            | CMC (ppm) |        |       |        |        |        |         |
|--------|----------------|-----------|--------|-------|--------|--------|--------|---------|
|        |                | 10 Hz     | 300 Hz | 1 kHz | 10 kHz | 20 kHz | 50 kHz | 100 kHz |
| 10 mA  | PTB (Německo)  | 3         | 2      | 2     | 2      | 2      | 3      | 3       |
|        | BEV (Rakousko) | 12        | 12     | 12    | 12     | 12     | 14     | 20      |
|        | SP (Švédsko)   | 8         | 4      | 4     | 4      | 4      | 7      | 13      |
| 100 mA | PTB (Německo)  | 3         | 2      | 2     | 2      | 2      | 3      | 3       |
|        | BEV (Rakousko) | 20        | 20     | 20    | 20     | 20     | 25     | 35      |
|        | SP (Švédsko)   | 9         | 5      | 5     | 5      | 5      | 8      | 16      |
| 1 A    | PTB (Německo)  | 4         | 3      | 3     | 3      | 4      | 6      | 10      |
|        | BEV (Rakousko) | 25        | 25     | 25    | 25     | 25     | 30     | 40      |
|        | SP (Švédsko)   | 10        | 7      | 7     | 7      | 7      | 14     | 27      |
| 10 A   | PTB (Německo)  | 20        | 20     | 20    | 20     | 30     | 40     | 75      |
|        | BEV (Rakousko) | 30        | 30     | 30    | 30     | 30     | 35     | 45      |
|        | SP (Švédsko)   | 16        | 11     | 11    | 11     | 11     | 30     | 55      |
| 100 A  | PTB (Německo)  | 40        | 40     | 40    | 40     | 80     | 100    | 160     |
|        | BEV (Rakousko) | 50        | 50     | 50    | 50     | 50     | 55     | 80      |
|        | SP (Švédsko)   | 20        | 17     | 17    | 17     | 21     | 55     | 110     |

## 4.2 Systémy pro měření výkonu

Vzhledem k tomu, že se v posledních letech objevily komerčně dostupné přístroje pro měření elektrického výkonu a měření kvality elektrické energie až do stovek kilohertz, vznikly požadavky na kalibraci těchto zařízení.

V posledních letech bylo vyvinuto několik měřicích systémů elektrického výkonu pracujících na různých principech pro širší frekvenční rozsah nebo velmi precizní pro výkonové frekvence (od 50 Hz až do 400 Hz):

- vzorkovací systémy,
- systémy využívající AC-DC difference,
- kombinace vzorkování a AC-DC difference,

- tří fázové měřicí systémy,
- systémy s návazností na kvantový Josephsonův jev.

V australském NMI (MNIA) byl vyvinut měřicí systém pro měření elektrického výkonu sinusových signálů o napětí do 1000 V, proudů do 20 A a frekvencích od 40 Hz do 200 kHz. Základním principem využívaným tímto etalonovým systémem byla zvolena AC-DC difference, neboť takové zařízení je snadno kalibrovatelné s dostatečně nízkými nejistotami vyhovujícími pro kalibraci komerčních přístrojů. Dva střídavé signály – napětí a proud – vstupující do kalibrovaného přístroje jsou zároveň přivedeny na napěťový dělič, resp. bočník, jejichž výstupy (nominálně 1 V) jsou připojeny přes oddělovací zesilovače na tepelný výkonový komparátor („Thermal Power Comparator“). Ten využívá mnohapřechodové termokonvertory k odvození neznámého střídavého výkonu od známého stejnosměrného. Výstup z komparátoru je úměrný rozdílu mezi střídavým a stejnosměrným výkonem. Standardní nejistoty měření tohoto systému se pohybují od méně než 5  $\mu\text{W/VA}$  na běžných výkonových frekvencích do 60 – 250  $\mu\text{W/VA}$  na 200 kHz dle rozsahu [49], [50].

Na velmi podobném principu byl v německém NMI (PTB) vyvinut etalon pro měření výkonu do 100 kHz tvořený násobičkou s planárními termokonvertory. Vstupními signály jsou střídavá napětí velikosti stovek milivoltů až jednotek voltů odpovídající proudu a napětí, jejichž činný výkon se má měřit. Nejistoty měření se pohybují v řádu jednotek  $\mu\text{W/VA}$  do 20 kHz, v řádu desítek  $\mu\text{W/VA}$  pak do 100 kHz [51].

Na odlišném principu pracuje digitální vzorkovací wattmetr vyvinutý v letech 1994 až 1998 ve švédském NMI (SP) v rámci doktorské práce, který umožňuje měření i nesinusových signálů. Základem toho systému je počítač zpracovávající data ze dvou synchronizovaných analogově-digitálních (AD) převodníků (digitálních multimetrů, DMM), které měří napěťové a proudové signály z výkonového generátoru. Napěťový signál je dělen indukčním děličem až na 10 V rozsah jednoho DMM, pomocí bočníků je proudový signál převáděn na 1 V rozsah druhého DMM. Výkonový generátor i oba DMM jsou synchronizovány skrz počítač pomocí frekvenčního generátoru. Navzorkovaná data jsou v počítači zpracována pomocí diskrétní Fourierovy transformace (DFT) a poté vyhodnocena. Základní rozsah v době vzniku toho systému byl napětí do 300 V, proudy 1 A a 5 A a frekvence 10 Hz až 20 kHz. Postupně je však svými tvůrci dále rozšiřován. Nejistota měření elektrického výkonu se na 120 V, 5 A a 20 kHz pohybuje na 300  $\mu\text{W/W}$  pro účinník roven jedné a 600  $\mu\text{W/W}$  pro účinník roven nule [52].

Kombinací vzorkovacích technik s AC-DC diferencí představuje primární etalon střídavého výkonu v německém PTB, který dosahuje na 600 VA (120 V, 5 A) na výkonových frekvencích nejistoty 1,2  $\mu\text{W/VA}$  (pro  $k = 1$ ). V roce 2008 byl tento systém vylepšen začleněním 10V Josephsonova syntezátoru, který umožnil přímou návaznost pro měření pomocí digitálního převodníku uvnitř systému [53], [54], [55].

Možným využitím střídavého kvantového Josephsonova etalonu pro měření výkonu se zabývali například také v americkém NISTu, kde vyvinuli systém pro velmi přesné generování 120 V, 5 A sinusového činného a jalového výkonu na frekvencích 50 Hz až 400 Hz s návazností právě na programovatelný Josephsonův napěťový etalon. Nejistota měření se pohybuje v jednotkách  $\mu\text{W/VA}$  [56].

Pro kalibraci tří fázových měřidel výkonu byl v německém PTB vyvinut speciální tří fázový vzorkovací etalonový měřicí systém, jehož jádrem jsou dva kaskádně zapojené digitální syntetizéry („Direct Digital Synthesizers“). Umožňuje měření výkonu až do 5 kHz s nejistotou do 10  $\mu\text{W/VA}$ , na výkonových frekvencích do 5  $\mu\text{W/VA}$  [57].

## 5. Cíle disertace

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 měly zajistit měření elektrického proudu s nejistotou v řádu jednotek ppm. Zde chybí dostatečně přesné modely bočníků, které by mohly být využity pro optimalizaci konstrukce jak z hlediska frekvenční závislosti modulu impedance (resp. AC-DC difference), tak i z hlediska frekvenční závislosti fázové chyby. Již existující více či méně přesné modely (popsané v kapitole 3.2) se zabývají pouze modulem impedance (potažmo AC-DC diferencí) bočníků a vstupní veličiny těchto modelů (kapacita, odpor a indukčnost částí bočníku) bývají ve většině případů získávány měřením nikoli výpočtem.

Hlavním cílem disertační práce je tak vývoj analytického modelu k již existujícím klecovým bočníkům ČMI [24], [25], který by vycházel přímo z geometrických rozměrů a materiálových vlastností použitých DPS, což by umožnilo kapacitu, odpor a indukčnost jednotlivých konstrukčních dílů vypočítat. Pouze vlastnosti osazených rezistorů bude nutné verifikovat měřením, protože údaje z katalogových listů výrobce nemusí být dostatečně přesné. Současně je nutné zajistit dostatečně přesné metody kalibrace AC-DC difference a fázové chyby bočníků, které by vedly k verifikaci modelu.

Vzhledem k tomu, že bočníky bývají obvykle používány pro odvozování stupnice AC-DC difference proudů, což předpokládá jejich použití v širším proudovém rozsahu (od 1/3 nominální hodnoty proudu), je nutné měřit také jejich výkonový koeficient odporu. Dále je vhodné stanovit i teplotní koeficient odporu vzhledem ke změnám teploty v laboratoři během měření.

Proto se disertační práce zaměřuje také na vhodné metody měření AC-DC difference, fázové chyby a výkonového a teplotního koeficientu odporu bočníků.

V závěrečné etapě řešení disertační práce pak bude analytický model použit k optimalizaci konstrukce existujících klecových bočníků ČMI 30 mA až 10 A a návrhu konstrukce bočníků pro 20 A, 50 A a 100 A tak, aby byla splněna kritéria:

- AC-DC difference <10 ppm a fázová chyba <100  $\mu$ rad na 5 A a 100 kHz,
- AC-DC difference <50 ppm a fázová chyba <500  $\mu$ rad na 100 A a 100 kHz.

To jsou požadavky, které byly zvoleny za cíl v konstrukci precizních bočníků v projektu iMERA-EMRP: Power and Energy. V tomto projektu se je podařilo splnit konstrukcí foliových bočníků, u klecových však nebyl splněn požadavek na fázovou chybu [61].

## 6. Měřicí metody

Navržené modely bočníků bude nutné ověřit (verifikovat) nejlépe na již existující sadě bočníků. Pro verifikaci modelu bude použita sada klecových bočníků ČMI od 30 mA do 10 A (viz kapitola 3.2.1.2.5). Pro kalibraci těchto bočníků bylo třeba nejprve zajistit na pracovišti vhodné měřicí metody.

Proudové bočníky, které se využívají ve velkém proudovém rozsahu (např. při krokování stupnice AC-DC difference proudů se každý bočník vždy používá od jedné třetiny nominální hodnoty až po nominální hodnotu proudu - viz kapitola 4.1), je nezbytné znát závislost odporu na hodnotě procházejícího proudu. Ta je charakterizována tzv. výkonovým koeficientem odporu („Power Coefficient of Resistance“, PCR). Odpor všech rezistorů (a tedy i bočníků) se také mění s teplotou, což se popisuje tzv. teplotním koeficientem odporu („Temperature Coefficient of Resistance“, TCR).

Co se týká frekvenčních vlastností, ty se obvykle charakterizují pomocí dvou veličin: AC-DC difference odporu (relativní odchylka impedance bočniku od hodnoty stejnosměrného odporu bočniku) a chyba fáze.

Pro měření teplotního a výkonového koeficientu bylo upraveno pracoviště pro měření stejnosměrného odporu tak, aby bylo možné měření provádět automaticky a aby bylo možné používat vzduchový termostat, do kterého se umísťovaly bočníky. Dále bylo nutné zajistit návaznost měření stejnosměrného odporu pro celý proudový rozsah bočníků.

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, kdy výstup kalibrovaného bočniku byl zatížen termokonvertorem.

### 6.1 Měření stejnosměrného odporu, teplotního a výkonového koeficientu

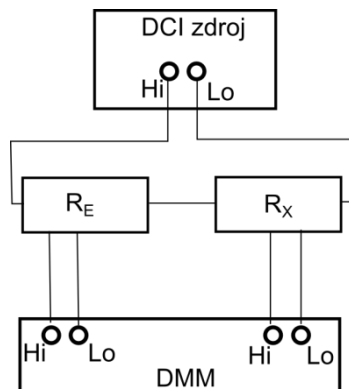
Před začátkem řešení umožňovalo pracoviště pouze ruční měření stejnosměrného odporu (DCR) etalonů (v rozsahu 0,0001  $\Omega$  - 1 G $\Omega$ ). Etalony se kalibrovaly obvykle pouze na jedné úrovni proudu, protože nebyly jiné požadavky ze strany zákazníků ani výzkumu.

V rámci řešení projektu EMRP ([60], [61]) bylo pracoviště upraveno a 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:

$$R_X = R_U R_E, \quad (6.1)$$

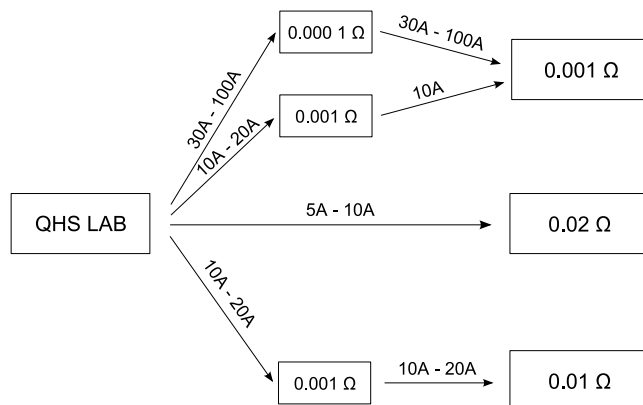
kde  $R_E$  je odpor referenčního etalonu [58], [59].

Kalibrovaný etalon (bočník) a referenční etalon jsou spojeny do série a k DC zdroji dle obrázku 6.1, 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  $R_U$  [58], [59].



Obrázek 6.1 Blokové schéma zapojení pro měření DCR

Jádrem pracoviště jsou tři olejové pracovní etalony (viz tabulka 6.1), které byly verifikovány v širším proudovém rozsahu pomocí sady primárních etalonů kalibrovaných v QHS laboratoři (viz schéma návaznosti na obrázku 6.2) [58], [59].



Obrázek 6.2 Schéma návaznosti kalibrace pracovních etalonů DCR

Tabulka 6.1 Parametry sady vybraných pracovních etalonů

| Nominální hodnota | Proudový rozsah | Typ  | Výrobce |
|-------------------|-----------------|------|---------|
| 0,02 Ω            | 5 A – 10 A      | 1682 | Tinsley |
| 0,01 Ω            | 10 A – 20 A     | RN I | Metra   |
| 0,001 Ω           | 30 A – 100 A    | RN I | Metra   |

Pomocí sady pracovních etalonů pak lze měřit DCR bočníku při různé teplotě okolí či různém měřicím proudu a tak stanovit jeho TCR a PCR (viz dále).

Výpočet nejistot měření DCR vychází z rovnice (6.1). Kombinovaná nejistota měření odporu bočníku může být spočítána jako:

$$u^2(\delta R_X) = c_{RU}^2 u^2(\delta R_U) + c_E^2 u^2(\delta R_E) + c_{rc}^2 u^2(\delta r_c) + c_{Ed}^2 u^2(\delta R_{Ed}) + c_{Et}^2 u^2(\delta R_{Et}) + c_{Xt}^2 u^2(\delta R_{Xt}), \quad (6.2)$$

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,  $c_{RU}$ ,  $c_E$ ,  $c_{rc}$ ,  $c_{Ed}$ ,  $c_{Et}$ ,  $c_{Xt}$  jsou příslušné citlivostní koeficienty [58], [59].

Typické rozšířené nejistoty měření pro různé hodnoty odporu kalibrovaného bočnicku s různým procházejícím proudem jsou uvedeny v tabulce 6.2 [58].

**Tabulka 6.2** Typické nejistoty měření DCR vzduchem chlazených etalonů/bočníků [58]

| Nominální hodnota | Proud | Rozšířená nejistota měření (k = 2) |
|-------------------|-------|------------------------------------|
| 0,1 Ω             | 5 A   | 8 ppm                              |
|                   | 10 A  | 6 ppm                              |
| 0,01 Ω            | 30 A  | 14 ppm                             |
|                   | 40 A  | 13 ppm                             |
| 0,005 Ω           | 40 A  | 16 ppm                             |
|                   | 70 A  | 13 ppm                             |
|                   | 100 A | 12 ppm                             |

### 6.1.1 Měření výkonového koeficientu bočníků

Výkonový koeficient odporu bočnicku  $PCR_{sh}$  je dán změnou odporu  $\Delta R$  se změnou procházejícího proudu (a tedy výkonu)  $\Delta P$  a počítá se podle:

$$PCR_{sh} = \frac{\Delta R}{\Delta P}. \quad (6.3)$$

Měření PCR tak spočívá v měření DCR bočnicku při nejméně dvou různých měřících proudech odpovídajících změně výkonu  $\Delta P$ . Pracoviště pro měření PCR tedy sestává ze sady referenčních etalonů (popsaných v předchozí kapitole v tabulce 6.1) 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 [58], [59].

Kombinovaná nejistota měření PCR je pak dána vztahem:

$$u^2(\delta PCR_{sh}) = c_{\Delta R}^2 u^2(\delta \Delta R) + c_{\Delta P}^2 u^2(\delta \Delta P), \quad (6.4)$$

kde  $c_{\Delta R} = PCR_{sh}/\Delta R$ ,  $c_{\Delta P} = PCR_{sh}/\Delta P$  [58], [59].

Příspěvek  $u^2(\delta\Delta R)$  je spočítán jako

$$u^2(\delta\Delta R) = u^2(\delta R_1) + u^2(\delta R_2), \quad (6.5)$$

kde  $u^2(\delta R_1)$  and  $u^2(\delta R_2)$  vycházejí z rovnice (6.2), a příspěvek  $u^2(\delta\Delta P)$  je:

$$u^2(\delta\Delta P) = u^2(\delta P_1) + u^2(\delta P_2). \quad (6.6)$$

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

$$u^2(\delta P_i) = c_{R_i}^2 u^2(\delta R_i) + 2c_{I_i}^2 u^2(\delta I_i), \quad (6.7)$$

kde citlivostní koeficienty jsou  $c_{R_i} = P_i/R_i$ ,  $c_{I_i} = P_i/I_i$  [58], [59].

Příspěvek  $u^2(\delta I_i)$  může být spočítán ze specifikací použitého proudového zdroje (nebo z jeho kalibračního listu) [58], [59].

### 6.1.2 Měření teplotního koeficientu bočníků

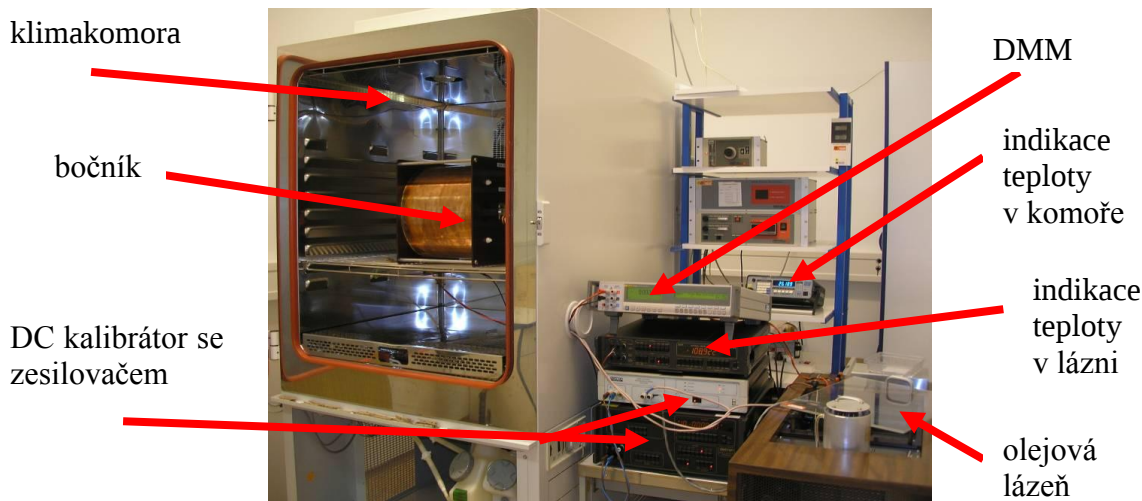
Teplotní koeficient odporu bočníku  $TCR_{sh}$  se počítá dle vztahu:

$$TCR_{sh} = \frac{\Delta R}{\Delta T}, \quad (6.8)$$

kde  $\Delta R$  změna odporu při změně teploty o  $\Delta T$  [58], [59].

Měření TCR tedy spočívá v měření DCR bočníku při nejméně dvou různých teplotách okolí odpovídajících změně teploty o  $\Delta T$ .

Na obrázku 6.3 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 [58], [59].



Obrázek 6.3 Pracoviště pro měření TCR

Kombinovaná nejistota měření se spočítá jako:

$$u^2(\delta TCR_{sh}) = c_{\Delta R}^2 u^2(\delta \Delta R) + c_{\Delta T}^2 u^2(\delta \Delta T) \quad (6.9)$$

kde citlivostní koeficienty jsou  $c_{\Delta R} = TCR_{sh}/\Delta R$ ,  $c_{\Delta T} = TCR_{sh}/\Delta T$  [58], [59].

Příspěvek  $u^2(\delta \Delta R)$  se spočítá podle rovnice (6.5) a příspěvek  $u^2(\delta \Delta T)$  podle:

$$u^2(\delta \Delta T) = u^2(\delta T_1) + u^2(\delta T_2), \quad (6.10)$$

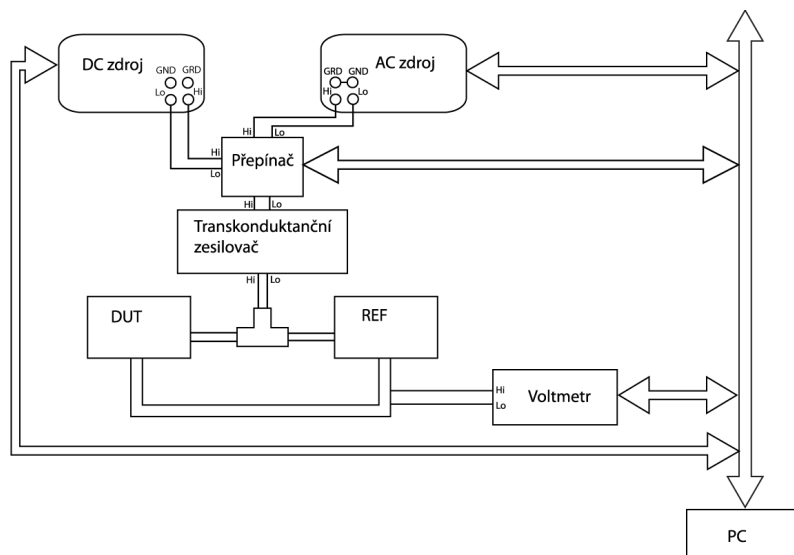
kde  $u^2(\delta T_1)$  a  $u^2(\delta T_2)$  mohou být spočítány ze specifikací použitého termostatického boxu (nebo kalibračních listů etalonů PT100, pokud jsou použity pro měření teplotního pole v boxu) [58], [59].

## 6.2 AC-DC difference bočníků

Pro měření AC-DC difference bočníků lze využít pracoviště pro odvozování stupnice AC-DC difference proudů (podrobně popsáno v kapitole 4.1).

Řešením úkolu technického rozvoje (TR) č. 860111 (součást Programu rozvoje metrologie III/5/08) [63] (publikováno v [24]) bylo vyřešeno odvození stupnice AC-DC difference proudů od 3 mA do 10 A a od 10 Hz do 10 kHz pomocí automatického měřicího systému. Toto pracoviště bylo poté v rámci řešení v úkolu TR č. 960111 [64] frekvenčně rozšířeno do 100 kHz (publikováno v [62]).

Na obrázku 6.4 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 [24], [62], [63], [64].



**Obrázek 6.4** Blokové schéma automatického měřicího systému pro AC-DC diferenci proudů

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 dle vztahu (4.1) lze pak interpretovat jako AC-DC difference kalibrovaného bočníku zatíženého PMJTC [63].

Ze vztahu (4.1) vyplývá, že základními složkami nejistoty měření vždy budou příspěvek kalibrace referenčního etalonu a příspěvek (směrodatná odchylka) naměřeného rozdílu diferencí referenčního a kalibrovaného etalonu [24], [62], [63], [64].

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 [24], [62], [63], [64]:

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

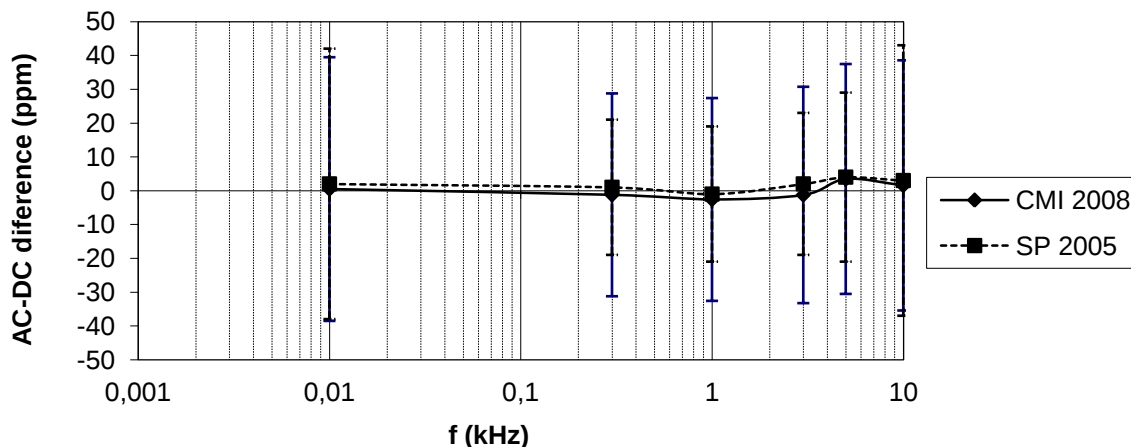
Vzhledem ke skutečnosti, že jednotlivé příspěvky jsou nekorelované, lze celkový příspěvek k nejistotě (standardní nejistota) vyjádřit jako odmocninu ze součtu druhých mocnin jednotlivých příspěvků. Zjednodušený vztah výpočet kombinované nejistoty měření je tedy dán následující rovnicí:

$$u^2(\delta_{dut}) = c_{ref}^2 u^2(\delta_{ref}) + c_{meas}^2 u^2(\delta_{meas}) + c_{set up}^2 u^2(\delta_{set up}) + c_{level}^2 u^2(\delta_{level}) + c_{conn}^2 u^2(\delta_{conn}) + c_{fr}^2 u^2(\delta_{fr}) + c_{tem}^2 u^2(\delta_{tem}) \quad (6.11)$$

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 [24], [62], [63], [64].

Jistou kontrolu správnosti použití této metody měření AC-DC difference bočníků bylo srovnání naměřených AC-DC diferencí 5 A bočníku švédské konstrukce s jeho kalibrací v SP v roce 2005. V grafu na obrázku 6.5 lze vidět velmi dobrou shodu ( $<3$  ppm) [63].



Obrázek 6.5 AC-DC difference odporu bočníku 5 A švédské konstrukce [63]

### 6.3 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 [26],
- měření fázového rozdílu výstupních napětí etalonu a bočníku [65], [66].

Princip první metody byl již naznačen v kapitole 3.2.1.2.3 popisující klecové bočníky SP, kde na základě zjednodušeného modelu klecového bočníku o indukčnosti  $L$ , odporu  $R$  a kapacitě  $C$  (z obrázku 3.12) byla stanovena impedance bočníku dle (3.16) [26]:

$$Z = R + j\omega L_{eq}. \quad (6.12)$$

Ze známé ekvivalentní indukčnosti  $L_{eq} = L - R^2 C$  lze stanovit indukčnost bočníku a fázovou chybu spočítat jako [26]:

$$\varphi_{sh} = \tan^{-1}(\omega L/R). \quad (6.13)$$

Z výše uvedeného vyplývá, že problém měření fázové chyby bočníku je převeden na měření jeho ekvivalentní indukčnosti porovnáním s etalonem indukčnosti. Z ní lze za předpokladu znalosti kapacity bočníku  $C$  stanovit jeho indukčnost  $L$  [26].

Vzhledem k tomu, že kapacita jednotlivých rezistorů je značně menší než kapacita těla bočníku, lze kapacitu bočníku stanovit jako kapacitu těla bočníku bez rezistorů (a kapacitu

rezistorů zanedbat). To však předpokládá mít k dispozici neosazenou konstrukci (nebo přerušit cestu přes rezistory vytážením jedné nožičky), kterou pak lze změřit RLC mostem.

Dále, měření velmi nízké ekvivalentní indukčnosti (desítky nH) předpokládá mít k dispozici etalon indukčnosti o řádově stejné velikosti s dostatečně nízkou nejistotou, který je známý v celém frekvenčním rozsahu (10 Hz – 100 kHz).

Druhou metodou měření fázového chyby bočníků je měření fázového rozdílu výstupních napětí etalonu a bočníku [65], [66]. Měření fázové chyby pak probíhá krokováním, kdy se v prvním kroku porovná bočník a etalon a poté jsou porovnávány vždy dva bočníky, z nichž jeden slouží jako etalon a druhý je kalibrován, aby v dalším kroku mohl být použit jako etalon a zkalibrovat tak další bočník (podobně jako při odvozování stupnice AC-DC difference proudů, kapitola 4.1). I v tomto případě je nutné mít k dispozici vhodný etalon fázové chyby (a to s dostatečně nízkou nejistotou ve frekvenčním rozsahu do 100 kHz).

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 [61] 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 [65].

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. V tabulce 6.3 je uvedena fázová chyba etalonového foliového bočníku stanovena v celém frekvenčním rozsahu včetně nejistoty měření [67].

**Tabulka 6.3** Fázová chyba etalonového foliového bočníku včetně nejistot měření pro  $k = 2$  [67]

| proud |                     | Frekvence (kHz) |        |       |       |      |      |      |
|-------|---------------------|-----------------|--------|-------|-------|------|------|------|
|       |                     | 0,5             | 1      | 5     | 10    | 20   | 50   | 100  |
| 10 A  | Fázová chyba (mrad) | 0,002           | -0,001 | 0,004 | 0,020 | 0,04 | 0,10 | 0,06 |
|       | Nejistota (mrad)    | 0,028           | 0,014  | 0,029 | 0,057 | 0,12 | 0,28 | 0,55 |

Měření fázové chyby bočníků pak probíhá opět krokováním 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) [67].

Fázová chyba kalibrovaného bočníku  $\varphi_{sh}$  se pak spočítá jako:

$$\varphi_{sh} = \Delta\varphi + \varphi_e = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{2} + \varphi_e, \quad (6.14)$$

kde  $\varphi_e$  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  $\Phi_1$  a  $\Phi_2$  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. [67].

Nejistota měření byla stanovována následovně. Nejistota typu B  $u^2(\delta_{set\ up})$  byla odvozena na základě testování fázového komparátoru [65]. 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  $u^2(\Delta\varphi)$  [67].

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

$$u^2(\varphi_{sh}) = c_{\Delta\varphi}^2 u^2(\Delta\varphi) + c_{\varphi_e}^2 u^2(\varphi_e) + c_{set\ up}^2 u^2(\delta_{set\ up}) + c_{level}^2 u^2(\varphi_{level}) \quad (6.15)$$

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

## 7. Kalibrace sady 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 8.

### 7.1 Kalibrace TCR a PCR bočníků

Vzhledem 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 bočníku 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 (6.8) [58], [59].

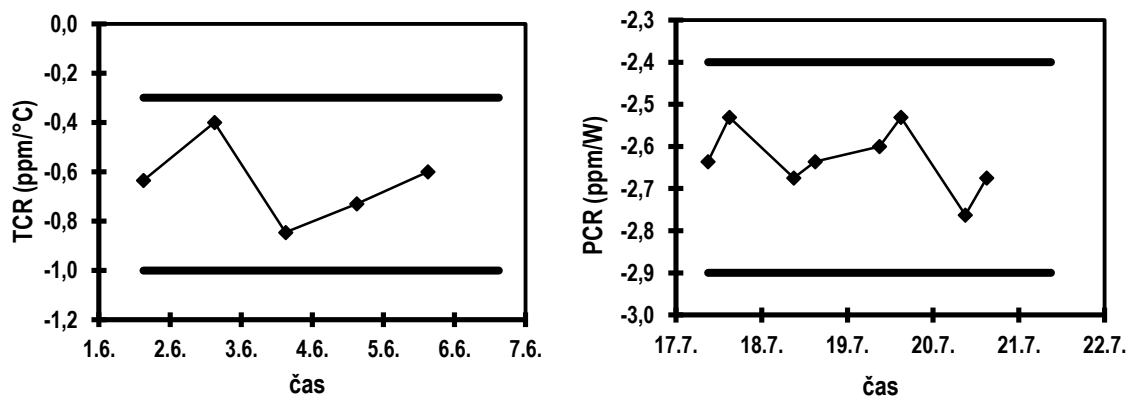
Dále byl změřen DCR bočníků při 30 % a 100 % nominální hodnoty, DCR 10 A bočníku pak při 50 % až 100 % nominální hodnoty, tedy v takovém rozsahu, jak se předpokládalo jejich použití při krokování stupnice AC-DC difference proudů [63]. Výkonový koeficient PCR byl pak spočítán z hodnot DCR dle (6.3).

V tabulce 7.1 jsou uvedeny naměřené hodnoty TCR a PCR bočníků včetně nejistot měření pro  $k = 2$  s normálním rozdělením.

**Tabulka 7.1** Naměřené hodnoty TCR a PCR bočníků s rozšířenými nejistotami měření pro  $k = 2$

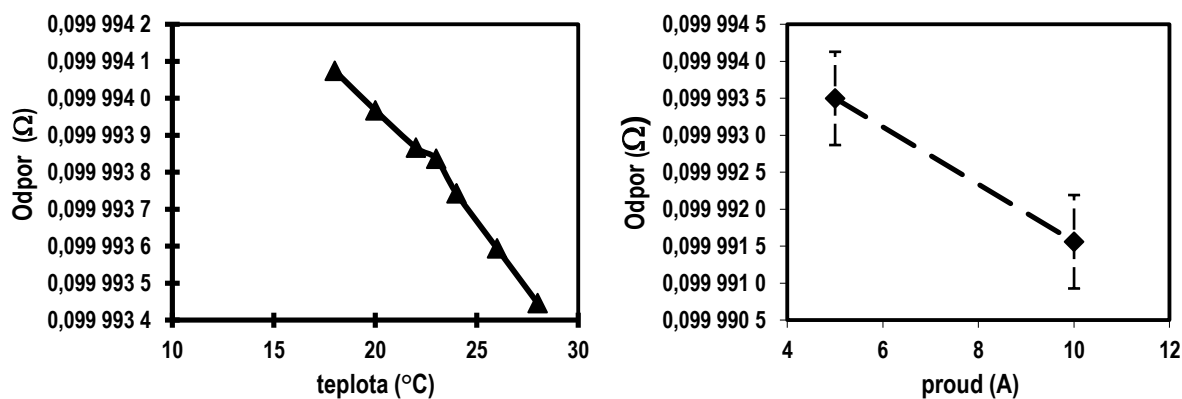
| Bočník | TCR<br>(ppm/K) | Nejistota<br>(ppm/K) | PCR<br>(ppm/W) | Nejistota<br>(ppm/W) |
|--------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|
| 30 mA  | -              | -                    | -8,50          | 0,44                 |
| 100 mA | -              | -                    | -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                  |

Vzhledem ke složitosti měření (zejména teplotní závislosti odporu bočníků) byla sledována také opakovatelnost měření, která byla menší než 0,5 ppm. V grafech na obrázku 7.1 je znázorněna opakovatelnost měření TCR a PCR pro 10 A bočník [58].

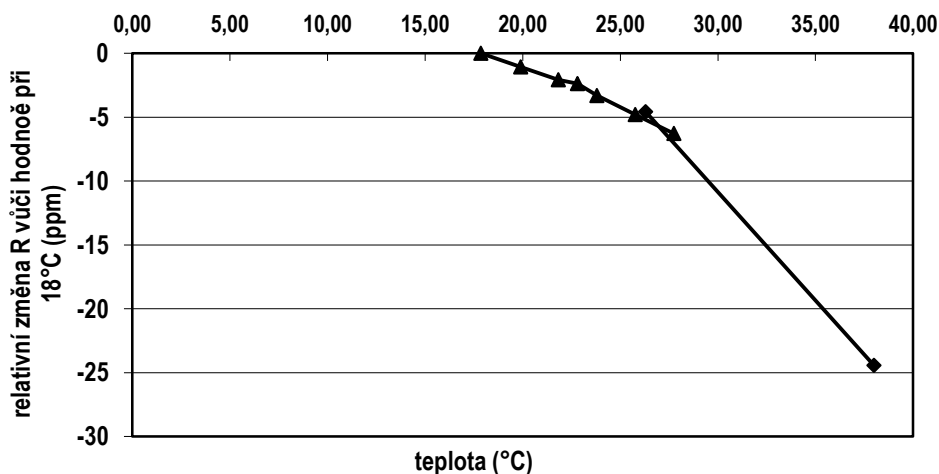


Obrázek 7.1 Opakovatelnost měření TCR (vpravo) a PCR (vlevo) 10 A bočnicku [58]

V grafech na obrázku 7.2 jsou pak uvedeny celé naměřené závislosti odporu na teplotě (vlevo) a na procházejícím proudu (vpravo) pro 10 A bočník, kde je vidět v obou případech přibližně lineární závislost typická pro klecový bočník. Na obrázku 7.3 jsou pak obě naměřené charakteristiky zkombinovány a je zobrazena závislost odporu bočnicku na teplotě, kdy křivka měření PCR dle očekávání plynule navazuje na křivku měření TCR [58], [60].



Obrázek 7.2 Závislost odporu bočnicku 10 A na teplotě (vpravo) a proudu (vlevo) [60]



Obrázek 7.3 Závislost odporu bočnicku 10 A na teplotě (kombinace měření TCR a PCR) [60]

## 7.2 Kalibrace AC-DC difference odporu 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  $\Omega$ . V následující tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty pro vybrané kmitočty včetně nejistot měření pro  $k = 2$  s normálním rozdělením.

**Tabulka 7.2** 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  |

## 7.3 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 10 A klecový bočník ČMI [67].

V následující tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty fázové chyby 10 A bočníku pro vybrané kmitočty včetně nejistot měření pro  $k = 2$  s normálním rozdělením [67].

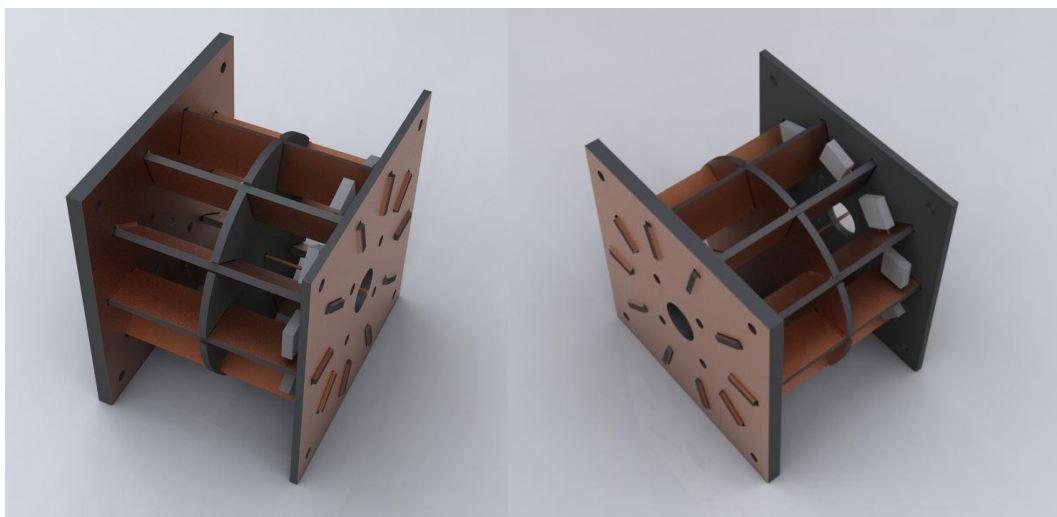
**Tabulka 7.3** Naměřené hodnoty fázové chyby 10 A bočníku, nejistoty měření pro  $k = 2$  [67]

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

## 8. Modelování bočníků

Na obrázku 8.1 je znázorněna vizualizace 100 mA klecového bočníku ČMI (bez konektorů). 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:

- 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.



**Obrázek 8.1** 3D vizualizace bočníku ČMI konstrukce pro 100 mA

K bočníkům byl sestaven analytický model počítající přenosovou impedanci bočníku, ze které je následně možné odvodit AC-DC diferenci a fázovou chybu.

Při výpočtech modelu byla k určení rozměrů konstrukčních částí bočníků používána výkresová dokumentace a katalogové listy konektorů, které jsou přiloženy v přílohách č. 1 a č. 3 na CD.

### 8.1 Vývoj analytického modelu

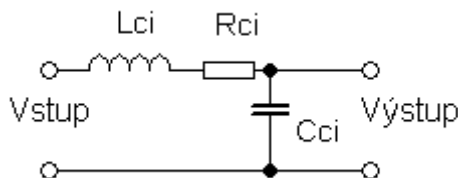
Při sestavování analytického (RLC) modelu bylo zvoleno kaskádní zapojení pasivních dvojbranů reprezentujících jednotlivé konstrukční části klecového bočníku. K těmto dvojbranům lze sestavit kaskádní matice, jejichž součin pak určuje kaskádní matici celého modelu. Z celkové kaskádní matice modelu pak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

Nejprve byly sestaveny kaskádní matice jednotlivých dvojbranů (konstrukčních částí), které pak byly použity k výpočtu přenosové impedance modelu bočníku.

### 8.1.1 Modelování konstrukčních částí

#### 8.1.1.1 Vstupní konektor

Vstupní konektor je v modelu reprezentován dvojbranem na obrázku 8.2 .



Obrázek 8.2 Dvojbran vstupního konektoru

Indukčnost  $L_{CI}$ , kapacitu  $C_{CI}$  a odpor  $R_{CI}$  lze vypočítat pomocí následujících vztahů, ve kterých je konektor zjednodušeně uvažován jako dva soustředné vodivé válce o poloměrech  $r_{1c}$  a  $r_{2c}$  ( $r_{2c} > r_{1c}$ ) délky  $l_c$  částečně s teflonem a částečně se vzduchem jako dielektrikem mezi nimi:

$$L_{CI} = \frac{\mu_0 \mu_{rc}}{2\pi} l_c \ln\left(\frac{r_{2c}}{r_{1c}}\right), \quad (8.1)$$

$$C_{CI} = 2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_{rc} l_c \frac{1}{\ln\left(\frac{r_{2c}}{r_{1c}}\right)}, \quad (8.2)$$

$$R_{CI} = \frac{1}{\sigma_c} \frac{l_c}{S_c}, \text{ kde průřez } S_c = \pi r_{1c}^2. \quad (8.3)$$

$\varepsilon_{rc}$  a  $\mu_{rc}$  jsou relativní permitivita a permeabilita prostředí,  $\varepsilon_0$  a  $\mu_0$  jsou permitivita a permeabilita vakua,  $\sigma_c$  je měrná vodivost.

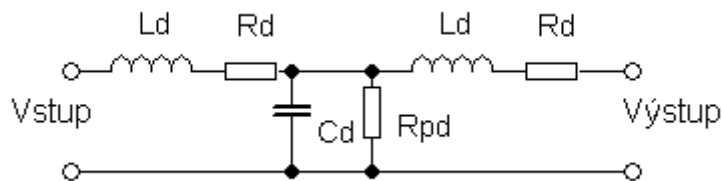
Kaskádní matice konektoru je pak:

$$\hat{A}_{CI} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{R_{CI} + j\omega L_{CI}}{\frac{1}{j\omega C_{CI}}} & R_{CI} + j\omega L_{CI} \\ \frac{1}{\frac{1}{j\omega C_{CI}}} & 1 \end{bmatrix} \quad (8.4)$$

#### 8.1.1.2 Vstupní část s deskami

Vstupní část bočníků je tvořena dvěma jednostrannými DPS tvaru čtverce, které jsou k sobě přiloženy stranou bez Cu vrstvy. Tím vznikne kapacitor s kapacitou  $C_d$  a svodovým odporem  $R_{pd}$ . V deskách jsou v kruhu připraveny otvory pro příčky. Ve středu jedné z desek je připojen panel vstupního konektoru (viz obrázek 8.1), k němuž se vrací měřený proud z příček. Uprostřed druhé desky je pak připojen střed konektoru, kterým přichází měřený

proud a ze středu desky je distribuován k příčkám. Proto je nutné uvažovat také vliv indukčnosti  $L_d$  a odporu  $R_d$  proudové cesty deskami. Na základě těchto úvah lze sestavit RLC dvojbran ke vstupní části bočnicku dle obrázku 8.3.



Obrázek 8.3 Dvojbran vstupní části bočnicku

Kapacitu  $C_d$  mezi deskami lze spočítat pomocí vztahu pro deskový kondenzátor, kde dielektrikum bude materiál FR4:

$$C_d = \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{rFR4}} \frac{S_d}{d_d}, \quad (8.5)$$

kde  $d_d$  je vzdálenost Cu vrstev obou desek ( $d_d = 2d_{\text{FR4}}$ ) a  $\varepsilon_{\text{rFR4}}$  relativní permitivita FR4. Plocha desky  $S_d$  se spočítá dle výkresové dokumentace jako:

$$S_d = l_d l_d - w_{\text{db}} n_b (r_{c3} - r_{c2}), \quad (8.6)$$

kde  $n_b$  je počet příček,  $l_d$  je délka desky,  $r_{c2}$  a  $r_{c3}$  určují vzdálenost začátku a konce osazení příček od středu desky (tedy  $r_{c3} - r_{c2}$  je šířka mezikruží, ve kterém jsou příčky osazovány) a  $w_{\text{db}}$  je šířka jednoho otvoru pro příčky.

Svodový odpor pak závisí na kapacitě  $C_d$ , ztrátovém činiteli  $\tan \delta$  a frekvenci  $f$  dle:

$$R_{\text{pd}} = \frac{1}{2\pi f C_d \tan \delta}. \quad (8.7)$$

Vzhledem k obecnému předpokladu, že proud teče cestou nejmenšího odporu, lze místo celých desek uvažovat pouze kruhové části od středu desek k otvorům pro příčky. Indukčnost kruhu lze odvodit pomocí analogie s mnoha obdélníkovými elementy uspořádanými v kruhu, kdy celková indukčnost je dána vlastní indukčností elementů a jednak vzájemnou indukčností elementů ležících proti sobě [68]. Vlastní indukčnost jednoho elementu je dle [68]:

$$L_{a1} = 0.002 l_e \left[ \log \left( \frac{2l_e}{0.447 d_e} \right) - 1 + \frac{0.447 d_e}{l_e} \right] 0.000001, \quad (8.8)$$

kde  $d_e$  je tloušťka elementu (tedy Cu vrstvy DPS),  $l_e$  je délka elementu  $l_e = r_{c2} - r_{c1}$  s  $r_{c1}$  jako poloměrem otvoru pro konektor a s  $r_{c2}$  udávajícím vzdálenost příček od středu desky.

Vzájemná indukčnost elementů naproti sobě je [68]:

$$M_{aa1} = 0.002[(2l_e + 2r_{c1})\log(2l_e + 2r_{c1}) + 2r_{c1}\log(2r_{c1}) - 2(l_e + 2r_{c1})\log(l_e + 2r_{c1})]0.000001. \quad (8.9)$$

Efektivní indukčnost pro jeden element je dána součtem vlastní a vzájemné indukčnosti [68]:

$$L_a = L_{a1} + M_{aa1}. \quad (8.10)$$

Celková indukčnost  $L_d$  pro celý kruh je pak dle [68]:

$$L_d = \frac{d_e}{2\pi r_{c1}} L_a. \quad (8.11)$$

Odpor kruhu  $R_d$  lze podle [68] vypočítat jako odpor:

$$R_d = \frac{1}{\sigma_{Cu} 2\pi d_e 0.01} \log\left(\frac{r_{c1}}{r_{c2}}\right), \quad (8.12)$$

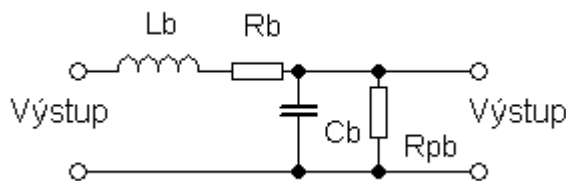
kde  $\sigma_{Cu}$  je měrná vodivost mědi.

Kaskádní matice  $A_I$  dvojbranu vstupní části bočníku pak nabude tento tvar:

$$\hat{A}_I = \begin{bmatrix} 1 + \frac{R_d + j\omega L_d}{\frac{R_{pd}}{j\omega C_d} + \frac{1}{R_{pd} + j\omega C_d}} & 2(R_d + j\omega L_d) + \frac{(R_d + j\omega L_d)^2}{\frac{R_{pd}}{j\omega C_d} + \frac{1}{R_{pd} + j\omega C_d}} \\ \frac{1}{\frac{R_{pd}}{j\omega C_d} + \frac{1}{R_{pd} + j\omega C_d}} & 1 + \frac{R_d + j\omega L_d}{\frac{R_{pd}}{j\omega C_d} + \frac{1}{R_{pd} + j\omega C_d}} \end{bmatrix}. \quad (8.13)$$

### 8.1.1.3 Příčky

Příčky slouží k distribuci měřeného proudu k rezistorům, které jsou umístěny na koncích příček. Jsou vyrobeny z oboustranné DPS a reprezentují tak mikropáskové vedení, které lze popsat dvojbranem na obrázku 8.4.



Obrázek 8.4 Dvojbran pro příčky

Odpor jedné příčky lze spočítat podle vztahu:

$$R_b = 2 \left( \frac{1}{\sigma_{Cu}} \frac{l_{br1}}{S_{br1}} + \frac{1}{\sigma_{Cu}} \frac{l_{br2}}{S_{br2}} \right), \quad (8.14)$$

kde  $\sigma_{Cu}$  je vodivost Cu vrstvy,  $S_{br1}$  je plocha průřezu Cu vrstvy  $S_{br1} = t_b w_b$ ,  $w_b$  je šířka příčky,  $t_b$  je tloušťka Cu vrstvy.  $S_{br2}$  je plocha průřezu Cu vrstvy příčky ve zúžených místech  $S_{br2} = t_b (w_b - 0.002)$ ,  $l_{br2} = l_b - 0,049$  je délka zúžených míst,  $l_{br2} = l_b - 0,011$  je délka širších částí příčky a  $l_b$  je celková délka příčky (dle výkresové dokumentace v příloze č. 1 na CD).

Kapacitu příčky lze opět spočítat pomocí vztahu pro deskový kondenzátor:

$$C_b = \varepsilon_0 \varepsilon_{rFR4} \frac{S_b}{d_{FR4}}, \quad (8.15)$$

kde  $d_{FR4}$  je tloušťka,  $\varepsilon_{rFR4}$  relativní permitivita DPS (FR4) a  $S_b$  je plocha příčky spočítaná dle výkresové dokumentace jako

$$S_b = l_{br1} w_b + l_{br2} (w_b - 0.002). \quad (8.16)$$

Indukčnost příčky lze vypočítat z impedance příčky a její kapacity dle:

$$L_b = Z_{vb} Z_{vb} C_b, \quad (8.17)$$

kde pro impedanci příčky  $Z_{vb}$  platí vztah pro impedanci mikropáskového vedení (plošný spoj na jedné straně desky, na druhé straně zem):

$$Z_{vb} = \frac{120\pi k}{\sqrt{k_1 k_2 \varepsilon_{rFR4}}}, \quad (8.18)$$

kde  $k = d_{FR4}/w_b$ ,  $k_1 = 1 + 1,5k$ ,  $k_2 = 1 + k$ ,  $w_b$  je šířka spoje.

Výsledná impedance paralelní kombinace všech  $n_b$  příček:

$$R_B = \frac{R_b}{n_b}, C_B = n_b C_b, L_B = \frac{L_b}{n_b}. \quad (8.19)$$

Svodový odpor je potom dán rovnicí:

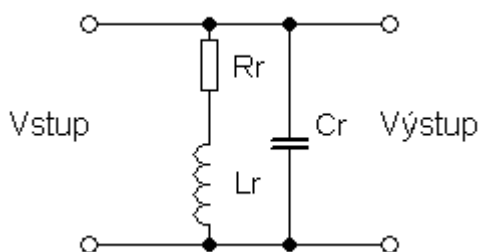
$$R_{pB} = \frac{1}{2\pi f C_B \tan \delta}. \quad (8.20)$$

Kaskádní matice  $A_B$  dvojbranu příček bočníku je pak:

$$\hat{A}_B = \begin{bmatrix} 1 + \frac{R_B + j\omega L_B}{R_{pB} \frac{1}{j\omega C_B}} & R_B + j\omega L_B \\ \frac{1}{R_{pB} \frac{1}{j\omega C_B}} & 1 \end{bmatrix}. \quad (8.21)$$

#### 8.1.1.4 Rezistory

Použité foliové rezistory jsou od firmy Vishay typu S102, u nichž výrobce uvádí maximální indukčnost 80 nH a kapacitu 5 pF (které pro výpočty bude nutné ověřit měřením - viz dále). Vznikne tak jednoduchý dvojbran na obrázku 8.5.



Obrázek 8.5 Dvojbran rezistorů

Výsledný odpor, indukčnost a kapacita použitých  $n_r$  rezistorů se spočítá jako:

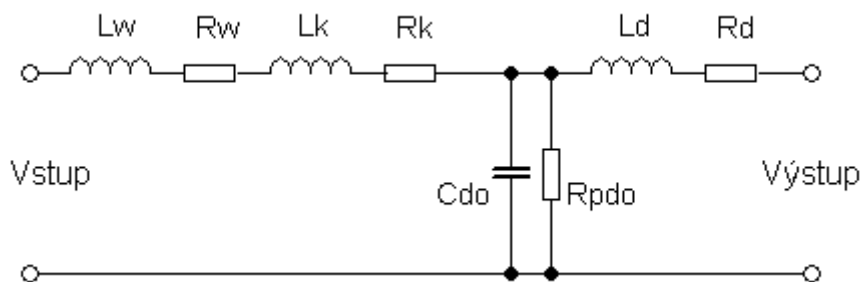
$$R_r = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_{n_r}}{R_1 R_2 \dots R_{n_r}}, \quad L_r = \frac{L_1 + L_2 + \dots + L_{n_r}}{L_1 L_2 \dots L_{n_r}}, \quad C_r = C_1 + C_2 + \dots + C_{n_r}. \quad (8.22)$$

Kaskádní matice rezistorů je pak:

$$\hat{A}_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{(R_r + j\omega L_r) \frac{1}{j\omega C_r}} & 1 \end{bmatrix}. \quad (8.23)$$

#### 8.1.1.5 Výstupní část s kruhem a deskou

Výstupní část je určena k měření napětí na rezistoru a je tvořena deskou, kruhem se zářezy pro příčky a drátkem, který vede ze středu kruhu ke středu výstupního konektoru. Na desce je připojen panelový výstupní N konektor a jsou v ní v kruhu umístěny otvory pro konce příček. Dvojbran celé výstupní části je uveden na obrázku 8.6.



Obrázek 8.6 Dvojbran výstupní části

Indukčnost a odpor desky  $L_d$  a  $R_d$  a kruhu  $L_k$  a  $R_k$  lze spočítat analogicky dle vztahu (8.11) a (8.12) uvedených v kapitole 8.1.1.2.

Kapacitu mezi kruhem a deskou lze spočítat jako kapacitu deskového kondenzátoru s třemi dielektriky FR4 – vzduch – FR4, tzn. jako kapacitu tří sériově řazených deskových kondenzátorů pro kruh  $C_k$ , vzduchovou mezeru  $C_{vz}$  a desku  $C_{ds}$  (s dielektriky FR4, vzduch a opět FR4) dle rovnice (8.5). Celková kapacita je pak dána vztahem:

$$C_{do} = \frac{C_k C_{vz} C_{ds}}{C_k + C_{vz} + C_{ds}}. \quad (8.24)$$

Pro svodový odpor platí opět vztah (8.7). Pro odpor a indukčnost drátku platí:

$$R_w = \frac{1}{\sigma_w} \frac{l_w}{S_w}, \text{ kde průřez } S_w = \pi r_w^2, \quad (8.25)$$

$$L_w = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} l_w \log(r_w), \quad (8.26)$$

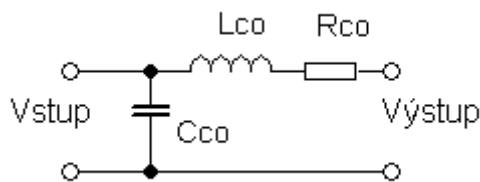
kde  $l_w$  je délka a  $r_w$  je poloměr drátku,  $\sigma_w$  je měrná vodivost materiálu, ze kterého je drátek vyroben, konečně  $\mu_r$  je relativní permeabilita prostředí.

Kaskádní matice celé výstupní části je:

$$\hat{A}_O = \begin{bmatrix} 1 + \frac{R_k + R_w + j\omega(L_k + L_w)}{\frac{R_{pdo}}{j\omega C_{do}}} & R_k + R_w + j\omega(L_k + L_w) \\ \frac{R_{pdo} + \frac{1}{j\omega C_{do}}}{\frac{R_{pdo}}{j\omega C_{do}}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_d + j\omega L_d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8.27)$$

#### 8.1.1.6 Výstupní konektor

Výstupní konektor je vždy typu N. Jeho dvojbran je na obrázku 8.7. Výpočet  $R_{CO}$ ,  $L_{CO}$  a  $C_{CO}$  je shodný s výpočtem pro vstupní konektor (viz kapitola 8.1.1.1).



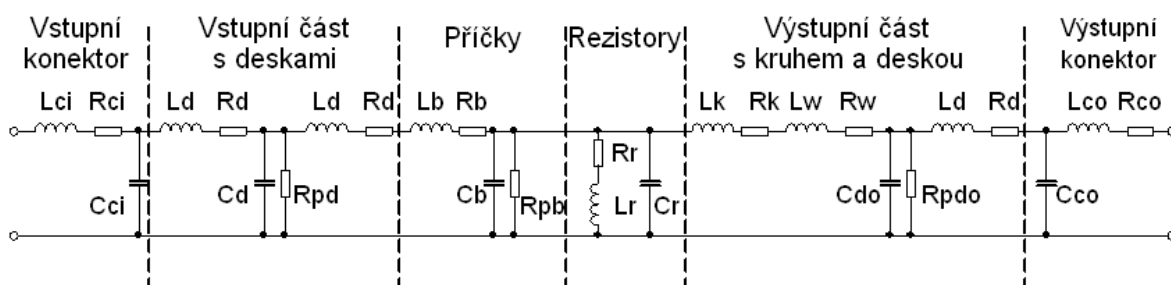
Obrázek 8.7 Dvojbran výstupního konektoru

Kaskádní matice má tvar:

$$\hat{A}_{CO} = \begin{bmatrix} 1 & R_{CO} + j\omega L_{CO} \\ \frac{1}{j\omega C_{CO}} & 1 + \frac{R_{CO} + j\omega L_{CO}}{j\omega C_{CO}} \end{bmatrix}. \quad (8.28)$$

### 8.1.2 Sestavení analytického modelu

Pokud se výše popsané dvojbrany jednotlivých konstrukčních částí spojí kaskádně za sebe, vznikne model celého bočnicku dle obrázku 8.8.



Obrázek 8.8 Model bočnicku

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

$$\hat{A}_S = \hat{A}_{CI} \hat{A}_I \hat{A}_B \hat{A}_R \hat{A}_O \hat{A}_{CO}. \quad (8.29)$$

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:

$$\hat{A} = \hat{A}_S \hat{A}_L. \quad (8.30)$$

Přenosová impedance modelu je dána převrácenou hodnotou prvku (2,1) matice  $\hat{A}$  :

$$\hat{Z}_T = \frac{1}{\hat{A}_{(2,1)}}. \quad (8.31)$$

Fázovou chybu lze pak spočítat jako:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\operatorname{Im}\{\hat{Z}_T\}}{\operatorname{Re}\{\hat{Z}_T\}}. \quad (8.32)$$

AC-DC difference je definována jako:

$$\delta_{\text{AC-DC}} = -\frac{Z_{Tm}(f) - Z_{Tm}(0)}{Z_{Tm}(0)} 1000000, [\text{ppm}] \quad (8.33)$$

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

## 8.2 Výpočet modelu

Nejprve bylo nutné zjistit materiálové vlastnosti (resp. verifikovat údaje výrobců) použité DPS a vlastnosti osazených rezistorů.

Pro vlastní výpočet modelu byl použit Matlab a pro každý bočník byl napsán samostatný skript s postupem výpočtu jeho přenosové impedance (vč. AC-DC difference a fázové chyby) naznačeného v předchozí kapitole. Všechny napsané skripty jsou uvedeny v příloze č. 2 na CD.

### 8.2.1 Určení vlastností použitých komponentů

K jednostranným a oboustranným DPS použitým ke konstrukci bočnic s dielektrikem FR4 a stejně tak k rezistorům v nich osazených vydávají jejich výrobci katalogové listy, ve kterých jsou uvedeny jejich základní vlastnosti. Vzhledem k tomu, že model, který popisuje bočnice, má počítat jejich vlastnosti na miliontiny, nemusí být přesnost materiálových vlastností DPS uváděných v katalogu dostatečná, obdobně maximální indukčnost a kapacita použitých rezistorů daná výrobcem nemusí být dostačující pro použití v modelu. Proto je nutné tyto vlastnosti ověřit měřením.

#### 8.2.1.1 Materiálové vlastnosti použitých DPS

Materiálovými vlastnostmi používanými při výpočtech jsou:

- relativní permitivita DPS,
- relativní permeabilita,
- ztrátový činitel DPS,
- měrná vodivost mědi.

Relativní permitivita a ztrátový činitel DPS a měrná vodivost mědi oboustranné DPS byly ověřeny měřením vzorku použité DPS o velikosti jedné příčky. Relativní permeabilita byla převzata z tabulek. Jednostranná DPS byla stejného typu a od stejného výrobce, proto se dalo předpokládat, že materiálové vlastnosti zůstanou stejné.

Na každou stranu příčky byl připájen drátek a RLC mostem byla nejprve změřena kapacita a svodový odpor  $C_b - R_{pb}$ , poté byly propojeny zdířky pro rezistor v nejvzdálenější pozici a byl změřen odpor Cu vrstvy  $R_b$ . V tabulce 8.1 je uvedena naměřená kapacita,

svodový odpor, odpor Cu vrstvy a geometrické rozměry DPS a z nich vypočtená relativní permitivita  $\varepsilon_{\text{rFR4}}$ , ztrátový činitel  $\tan \delta$  a měrná vodivost mědi  $\sigma_{\text{Cu}}$  dle následujících vztahů:

$$\varepsilon_{\text{rFR4}} = \frac{C_b d_{\text{FR4}}}{\varepsilon_0 l_b w_b}, \quad (8.34)$$

$$\sigma_{\text{Cu}} = 2 \frac{1}{R_b} \frac{l_b}{S_b}, \quad (8.35)$$

$$\tan \delta = \frac{1}{2\pi f C_b R_{\text{pb}}}. \quad (8.36)$$

Nejistoty měření byly počítány metodou Monte Carlo (více v kapitole 8.3 nebo v [71]).

**Tabulka 8.1** Měření relativní permitivity a ztrátového činitele DPS (FR4) a měrné vodivosti mědi

| Parametr              | Symbol                        | Hodnota                 | Interval hodnot                | Nejistota (k = 1) | Rozdělení  |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------|------------|
| Kapacita              | $C_b$                         | 16,7 pF                 | -                              | 0,5 pF            | normální   |
| Tloušťka DPS          | $d_{\text{FR4}}$              | 0,002 m                 | $\pm 0,00015$ m                | -                 | rovnoměrné |
| Délka DPS             | $l_b$                         | 0,06 m                  | $\pm 0,0003$ m                 | -                 | rovnoměrné |
| Šířka DPS             | $w_b$                         | 0,012 m                 | $\pm 0,0003$ m                 | -                 | rovnoměrné |
| Povrch DPS            | $S_b$                         | 0,000698 m <sup>2</sup> | $\pm 0,0000005$ m <sup>2</sup> | -                 | rovnoměrné |
| Odpor                 | $R_b$                         | 0,01 $\Omega$           | -                              | 0,001 $\Omega$    | normální   |
| Svodový odpor         | $R_{\text{pb}}(50\text{kHz})$ | 9,51e6 $\Omega$         | -                              | 0,3e6 $\Omega$    | normální   |
| Relativní permitivita | $\varepsilon_{\text{rFR4}}$   | 5,45                    | -                              | 0,2               | normální   |
| Měrná vodivost        | $\sigma_{\text{Cu}}$          | 5,2e6                   | -                              | 0,6e6             | normální   |
| Ztrátový činitel      | $\tan \delta$                 | 0,0205                  | -                              | 0.0009            | normální   |

Také je třeba uvažovat možný vliv skin efektu. Hloubka vniku se počítá dle:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \mu_0 \mu_r \sigma_{\text{Cu}}}} \quad (8.37)$$

Výpočet pro frekvenci 100 kHz ukazuje, že hloubka vniku je 698  $\mu\text{m}$  (tedy větší než tloušťka Cu vrstvy DPS), tzn. že ve studovaném rozsahu frekvencí je vliv skin efektu zanedbatelný.

### 8.2.1.2 Vlastnosti použitých rezistorů

Bočníky jsou osazeny foliovými rezistory firmy Vishay typu S102(C,K) a Z201 o odporech 150  $\Omega$ , 100  $\Omega$  a 10  $\Omega$  s tolerancí 0,1 % dle tabulky 3.1. Výrobce u těchto rezistorů uvádí maximální indukčnost 80 nH a kapacitu 5 pF (viz katalogové listy v příloze č. 3 na CD).

Pro ověření údajů od výrobce bylo vybráno 25 kusů rezistorů od každé použité nominální hodnoty 150  $\Omega$ , 100  $\Omega$  a 10  $\Omega$ . V následující tabulce jsou uvedeny průměrné hodnoty indukčnosti a kapacity pro každou nominální hodnotu změřené pomocí RLC mostu a průměrné hodnoty odporu měřené na pracovišti pro měření DCR (viz kapitola 6.1).

Tabulka 8.2 Výsledky měření rezistorů

| Rezistor     | Parametr   | Hodnota          | Nejistota ( $k = 1$ ) | Rozdělení |
|--------------|------------|------------------|-----------------------|-----------|
| 150 $\Omega$ | Odpor      | 149.981 $\Omega$ | 0.003 $\Omega$        | normální  |
|              | Indukčnost | 13 nH            | 1.5 nH                | normální  |
|              | Kapacita   | 1,7 pF           | 0.5 pF                | normální  |
| 100 $\Omega$ | Odpor      | 99.979 $\Omega$  | 0.002 $\Omega$        | normální  |
|              | Indukčnost | 12 nH            | 1.5 nH                | normální  |
|              | Kapacita   | 1,7 pF           | 0.5 pF                | normální  |
| 10 $\Omega$  | Odpor      | 9.9971 $\Omega$  | 0.0002 $\Omega$       | normální  |
|              | Indukčnost | 9,5 nH           | 1.5 nH                | normální  |
|              | Kapacita   | 1,7 pF           | 0.5 pF                | normální  |

## 8.2.2 Výpočet R, L, C konstrukčních dílů

Pro výpočet R, L a C jednotlivých konstrukčních částí byly napsány funkce v Matlabu, jejichž vstupem jsou materiálové vlastnosti a rozměry dílů. V hlavním programu je pak pomocí for cyklu dopočítán pro zvolené frekvence svodový odpor.

### 8.2.2.1 Vstupní konektor

Vstupní konektor je pro bočníky 30 mA až 1 A stejného typu – N-female, pro bočníky 10 A a 20 A pak UHF-female V tabulkách 8.3 a 8.4 jsou uvedeny materiálové vlastnosti a rozměry N-female a UHF-female panelových konektorů fy. Radiall (čerpáno z katalogových listů v příloze č. 3 na CD), které byly použity při výrobě bočnicků. Měrná vodivost zlata a stříbra, relativní permitivita vzduchu a teflonu jsou brány jako průměr tabulkových hodnot. Dále jsou zde uvedeny  $R_{CI}$ ,  $L_{CI}$  a  $C_{CI}$  vypočítané pro tyto konektory pomocí rovnic uvedených v kapitole 8.1.1.1 začleněných do matlabovské funkce *connector()*.

Tabulka 8.3 Parametry N-female konektoru

| Parametr                          | Symbol           | Hodnota  | Rozměr     |
|-----------------------------------|------------------|----------|------------|
| Vnitřní poloměr                   | $r_{1c}$         | 0,001515 | m          |
| Vnější poloměr                    | $r_{2c}$         | 0,0034   | m          |
| Délka se vzduchovou mezerou       | $l_{ca}$         | 0,00475  | m          |
| Délka s teflonovým dielektrikem   | $l_{ct}$         | 0,0102   | m          |
| Celková délka konektoru           | $l_c$            | 0,01495  | m          |
| Vodivost vnitřního vodiče (zlato) | $\sigma_c$       | 4,4e7    | S/m        |
| Relativní permitivita vzduchu     | $\epsilon_{rca}$ | 1,00057  | -          |
| Relativní permitivita teflonu     | $\epsilon_{rct}$ | 2,3      | -          |
| Relativní permeabilita prostředí  | $\mu_r$          | 1        | -          |
| Odpor                             | $R_{CI}$         | 0,047    | m $\Omega$ |
| Indukčnost                        | $L_{CI}$         | 2,41     | nH         |
| Kapacita                          | $C_{CI}$         | 1,94     | pF         |

Tabulka 8.4 Parametry UHF-female konektoru

| Parametr                            | Symbol              | Hodnota | Rozměr |
|-------------------------------------|---------------------|---------|--------|
| Vnitřní poloměr                     | $r_{1c}$            | 0,0015  | m      |
| Vnější poloměr                      | $r_{2c}$            | 0,0055  | m      |
| Délka se vzduchovou mezerou         | $l_{ca}$            | 0       | m      |
| Délka s teflonovým dielektrikem     | $l_{ct}$            | 0,0163  | m      |
| Celková délka konektoru             | $l_c$               | 0,0163  | m      |
| Vodivost vnitřního vodiče (stříbro) | $\sigma_c$          | 6.3e7   | S/m    |
| Relativní permitivita vzduchu       | $\varepsilon_{rca}$ | 1,00057 | -      |
| Relativní permitivita teflonu       | $\varepsilon_{rct}$ | 2,3     | -      |
| Relativní permeabilita prostředí    | $\mu_r$             | 1       | -      |
| Odpor                               | $R_{CI}$            | 0,366   | mΩ     |
| Indukčnost                          | $L_{CI}$            | 4,24    | nH     |
| Kapacita                            | $C_{CI}$            | 1,61    | pF     |

### 8.2.2.2 Vstupní část s deskami

Vstupní desky jsou vyrobeny z jednostranné DPS, pro 30 mA bočník tloušťky 1,5 mm, pro ostatní bočníky pak tloušťky 2 mm. Rozměry desek se pro jednotlivé bočníky liší, stejně tak některé vlastnosti použitých DPS – viz následující tabulka.

Tabulka 8.5 Parametry vstupní části

| Parametr                  | Symbol               | Hodnota pro 30 mA bočník | Hodnota pro 100 a 300 mA bočník | Hodnota pro 1 A bočník | Hodnota pro 10 A bočník | Rozměr |
|---------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------|------------------------|-------------------------|--------|
| Rozměr desky              | $l_d$                | 0,086                    | 0,072                           | 0,136                  | 0,26                    | m      |
| Vnitřní poloměr mezikruží | $r_{c2}$             | 0,023                    | 0,021                           | 0,053                  | 0,115                   | m      |
| Vnější poloměr mezikruží  | $r_{c3}$             | 0,038                    | 0,031                           | 0,063                  | 0,125                   | m      |
| Tloušťka FR4              | $d_{FR4}$            | 0,0015                   | 0,002                           |                        |                         | m      |
| Tloušťka Cu vrstvy        | $t_d$                | 0,000035                 | 0,000035                        |                        |                         | m      |
| Ztrátový činitel FR4      | $\tan \delta$        | 0,0205                   |                                 |                        |                         | -      |
| Vodivost mědi             | $\sigma_{Cu}$        | 5,2e7                    |                                 |                        |                         | S/m    |
| Relativní permitivita FR4 | $\varepsilon_{rFR4}$ | 5                        | 5,45                            |                        |                         | -      |
| Odpor                     | $R_d$                | 0,64                     | 0,466                           | 0,61                   | 0,726                   | mΩ     |
| Indukčnost                | $L_d$                | 3,73                     | 2,67                            | 17,9                   | 61,37                   | nH     |
| Kapacita                  | $C_d$                | 103,6                    | 59,52                           | 215,6                  | 800,4                   | pF     |
| Svodový odpor (100 kHz)   | $R_{dp}$             | 749,3                    | 1304                            | 360,1                  | 97                      | kΩ     |

Kapacitu  $C_d$  mezi vstupními deskami uvedenou v předchozí tabulce počítá v Matlabu funkce *desk()*, odpor  $R_d$  a indukčnost  $L_d$  pak funkce *selby()* dle rovnic uvedených v kapitole 8.1.1.2. Svodový odpor  $R_{dp}$  je počítán přímo v hlavním programu pro zvolený vektor frekvencí.

### 8.2.2.3 Příčky

Příčky jsou jediným konstrukčním dílem, který je vyroben z oboustranné DPS. 30 mA bočník má příčky z DPS tloušťky 1,5 mm, ostatní bočníky pak z 2 mm DPS. Také rozměr příček se pro 30 mA a ostatní bočníky liší, stejně tak některé vlastnosti použitých DPS – viz tabulka 8.6.

Celkové  $R_B$ ,  $L_B$  a  $C_B$  příček uvedených v tabulce 8.6 počítá v Matlabu funkce *barr()* dle rovnic uvedených v kapitole 8.1.1.3. Svodový odpor  $R_{Bp}$  je pak dopočítán v hlavním programu pro vybraný frekvenční vektor.

**Tabulka 8.6** Parametry příček

| Parametr                  | Symbol               | Hodnota<br>pro 30 mA<br>bočník | Hodnota<br>pro 100 a<br>300 mA<br>bočník | Hodnota<br>pro<br>1 A<br>bočník | Hodnota<br>pro<br>10 A<br>bočník | Rozměr |
|---------------------------|----------------------|--------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------|
| Počet příček              | $n_b$                | 10                             | 10                                       | 25                              | 50                               | -      |
| Šířka příčky              | $w_b$                | 0,017                          | 0,012                                    |                                 |                                  | m      |
| Délka příčky              | $l_b$                | 0,037                          | 0,06                                     |                                 |                                  | m      |
| Délka zúžené části příčky | $l_{br1}$            | 0,009                          | 0,011                                    |                                 |                                  | m      |
| Délka širší části příčky  | $l_{br2}$            | 0,028                          | 0,049                                    |                                 |                                  | m      |
| Tloušťka FR4              | $d_{FR4}$            | 0,0015                         | 0,002                                    |                                 |                                  | m      |
| Tloušťka Cu vrstvy        | $t_{Cu}$             | 0,000018                       |                                          |                                 |                                  | m      |
| Ztrátový činitel FR4      | $\tan \delta$        | 0,0205                         |                                          |                                 |                                  | -      |
| Vodivost mědi             | $\sigma_{Cu}$        | 5,2e7                          |                                          |                                 |                                  | S/m    |
| Relativní permeabilita    | $\mu_r$              | 1                              |                                          |                                 |                                  | -      |
| Relativní permitivita FR4 | $\varepsilon_{rFR4}$ | 5                              | 5,45                                     |                                 |                                  | -      |
| Odpor                     | $R_B$                | 0,156                          | 1,107                                    | 0,443                           | 0,159                            | mΩ     |
| Indukčnost                | $L_B$                | 0,35                           | 0,965                                    | 0,386                           | 0,193                            | nH     |
| Kapacita                  | $C_B$                | 180,3                          | 168,4                                    | 421                             | 842                              | pF     |
| Svodový odpor (100 kHz)   | $R_{Bp}$             | 430,5                          | 461                                      | 184,4                           | 92,2                             | kΩ     |

### 8.2.2.4 Rezistory

Jednotlivé bočníky byly osazeny rezistory Z201 nebo S102C,K fy.Vishay dle tabulky 8.2 uvedené v kapitole 8.1.1.4. V následující tabulce jsou uvedeny vlastnosti rezistorů použité k výpočtům. K naměřeným hodnotám indukčnosti byla připočtena indukčnost nožiček 6,5 nH, resp. 5 nH u 30 mA bočníku (tloušťka DPS 2x 2 mm, resp 2x 1,5 mm u 30 mA bočníku , 2x 0,5 mm větší vzduchová mezera než při měření, spočítáno dle rovnice (8.26) a indukčnost 2x 1 nH pro pájení nožiček. K naměřené hodnotě kapacity bylo připočteno 0,3 pF odpovídající delším nožičkám.

Tabulka 8.7 Parametry rezistorů

| Parametr                        | Symbol | Hodnota<br>pro<br>30 mA<br>bočník | Hodnota<br>pro<br>100 mA<br>bočník | Hodnota<br>pro<br>300 mA<br>bočník | Hodnota<br>pro<br>1 A<br>bočník | Hodnota<br>pro<br>10 A<br>bočník | Rozměr   |
|---------------------------------|--------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------|
| Počet příček                    | $n_b$  | 10                                | 10                                 | 10                                 | 25                              | 50                               | -        |
| Počet<br>rezistorů na<br>příčce | $n_r$  | 0,3                               | 1                                  | 3                                  | 4                               | 2                                | -        |
| Odpor                           | $R_r$  | 149,981                           | 99,979                             |                                    |                                 | 9,9971                           | $\Omega$ |
| Indukčnost                      | $L_r$  | 20,0                              | 20,5                               |                                    |                                 | 18                               | nH       |
| Kapacita                        | $C_r$  | 2                                 | 2                                  |                                    |                                 | 2                                | pF       |
| Odpor                           | $R_R$  | 49,9937                           | 9,9979                             | 3,33263                            | 0,99979                         | 0,09971                          | $\Omega$ |
| Indukčnost                      | $L_R$  | 7                                 | 2,05                               | 0,683                              | 0,205                           | 0,18                             | nH       |
| Kapacita                        | $C_R$  | 6                                 | 20                                 | 60                                 | 200                             | 200                              | pF       |

### 8.2.2.5 Výstupní část s kruhem a deskou

Výstupní deska a kruh jsou vyrobeny z jednostranné DPS, pro 30 mA bočník tloušťky 1,5 mm, pro ostatní bočníky pak tloušťky 2 mm. Rozměry se opět pro jednotlivé bočníky liší, stejně tak některé vlastnosti použitých DPS – viz tabulka 8.8.

Kapacitu  $C_{do}$  výstupní části uvedenou v tabulce počítá v Matlabu funkce *circle\_desk()*, odpor a indukčnost  $R_k$  a  $L_k$  kruhu a  $R_d$ ,  $L_d$  desky pak funkce *selby()* a odpor a indukčnost drátku  $R_w$  a  $L_w$  funkce *wire()* dle rovnic uvedených v kapitole 8.1.1.5. Svodový odpor  $R_{dpo}$  je pak dopočítán v hlavním programu pro zadaný vektor frekvencí.

### 8.2.2.6 Výstupní konektor

Výstupní konektor je pro všechny bočníky stejného typu – N-male. V tabulce 8.9 je uveden přehled materiálových vlastností a rozměrů N-male panelového konektoru fy. Radiall (čerpáno z katalogových listů v příloze č. 3 na CD), který byl použit při výrobě bočníku. Dále jsou zde uvedeny  $R_{co}$ ,  $L_{co}$  a  $C_{co}$  vypočítané pro tento konektor pomocí rovnic uvedených v kapitole 8.1.1.6 začleněných do matlabovské funkce *connector()*.

Tabulka 8.8 Parametry výstupní části

| Parametr                                       | Symbol               | Hodnota pro 30 mA bočník | Hodnota pro 100 a 300 mA bočník | Hodnota pro 1 A bočník | Hodnota pro 10 A bočník | Rozměr |
|------------------------------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------|------------------------|-------------------------|--------|
| Rozměr desky                                   | $l_d$                | 0,086                    | 0,072                           | 0,136                  | 0,26                    | m      |
| Vnitřní poloměr kruhu                          | $r_{c1}$             | 0,001                    | 0,001                           |                        |                         | m      |
| Vnitřní poloměr mezikruží                      | $r_{c2}$             | 0,023                    | 0,021                           | 0,053                  | 0,115                   | m      |
| Vnější poloměr mezikruží                       | $r_{c3}$             | 0,038                    | 0,031                           | 0,063                  | 0,125                   | m      |
| Velikost vzduchové mezery mezi kruhem a deskou | $d_a$                | 0,014                    | 0,024                           |                        |                         | m      |
| Tloušťka FR4                                   | $d_{FR4}$            | 0,0015                   | 0,002                           |                        |                         | m      |
| Tloušťka Cu vrstvy                             | $t_{Cu}$             | 0,000035                 |                                 |                        |                         | m      |
| Ztrátový činitel FR4                           | $\tan \delta$        | 0,0205                   |                                 |                        |                         | -      |
| Vodivost mědi                                  | $\sigma_{Cu}$        | 5,2e7                    |                                 |                        |                         | S/m    |
| Relativní permitivita FR4                      | $\varepsilon_{rFR4}$ | 5                        | 5,45                            |                        |                         | -      |
| Délka drátku                                   | $l_w$                | 0,014                    | 0,024                           |                        |                         | m      |
| Poloměr drátku                                 | $r_w$                | 0,0005                   |                                 |                        |                         | m      |
| Vodivost hliníku                               | $\sigma_w$           | 3,6e7                    |                                 |                        |                         | S/m    |
| Odpor desky                                    | $R_d$                | 0,64                     | 0,466                           | 0,61                   | 0,726                   | mΩ     |
| Indukčnost desky                               | $L_d$                | 3,73                     | 2,67                            | 17,9                   | 61,37                   | nH     |
| Kapacita                                       | $C_{do}$             | 2,4                      | 0,93                            | 4,1                    | 16,92                   | pF     |
| Svodový odpor (100 kHz)                        | $R_{dpo}$            | 32,31                    | 83,55                           | 18,84                  | 4,59                    | MΩ     |
| Odpor kruhu                                    | $R_k$                | 0,64                     | 0,466                           | 0,61                   | 0,726                   | mΩ     |
| Indukčnost kruhu                               | $L_k$                | 3,73                     | 2,67                            | 17,9                   | 61,37                   | nH     |
| Odpor drátku                                   | $R_w$                | 0,473                    | 0,81                            | 0,81                   | 0,81                    | mΩ     |
| Indukčnost drátku                              | $L_w$                | 17,4                     | 29,3                            | 29,3                   | 29,3                    | nH     |

Tabulka 8.9 Parametry N konektoru

| Parametr                          | Symbol           | Hodnota  | Rozměr |
|-----------------------------------|------------------|----------|--------|
| Vnitřní průměr                    | $r_{1c}$         | 0,001515 | m      |
| Vnější průměr                     | $r_{2c}$         | 0,0034   | m      |
| Délka se vzduchovou mezerou       | $l_{ca}$         | 0,00475  | m      |
| Délka s teflonovým dielektrikem   | $l_{ct}$         | 0,0102   | m      |
| Celková délka konektoru           | $l_c$            | 0,01495  | m      |
| Vodivost vnitřního vodiče (zlato) | $\sigma_c$       | 44,0e6   | S/m    |
| Relativní permitivita vzduchu     | $\epsilon_{rca}$ | 1,00057  | -      |
| Relativní permitivita teflonu     | $\epsilon_{rct}$ | 2,3      | -      |
| Relativní permeabilita            | $\mu_r$          | 1        | -      |
| Odpor                             | $R_{CO}$         | 0,047    | mΩ     |
| Indukčnost                        | $L_{CO}$         | 2,41     | nH     |
| Kapacita                          | $C_{CO}$         | 1,94     | pF     |

### 8.2.2.7 Zátěž

V tabulce 8.10 jsou uvedeny vstupní impedance zátěží, které byly použity při měření AC-DC difference a fázové chyby bočníků a bylo tedy nutné použít je při výpočtu modelu kvůli porovnání vypočtených a naměřených hodnot.

**Tabulka 8.10** Vstupní impedance různých zátěží

| Parametr   | Symbol | TC | AGT | Rozměr   |
|------------|--------|----|-----|----------|
| Odpor      | $R_L$  | 90 | 5e4 | $\Omega$ |
| Indukčnost | $L_L$  | -  | -   | nH       |
| Kapacita   | $C_L$  | -  | -   | pF       |

## 8.2.3 Výpočet impedance, AC-DC difference a fázové chyby celého modelu

Na základě vypočítaných R, L a C konstrukčních dílů byl proveden výpočet kaskádních matic těchto dílů dle rovnic uvedených v kapitole 8.1.1 a poté kaskádní matice bočníku dle rovnice (8.27), resp. (8.28) pro různé zátěže na výstupu bočníků. Celý výpočet byl v Matlabu proveden přímo v hlavním programu skriptů k jednotlivým bočníkům a pomocí for cyklu pak pro vybraný frekvenční vektor. V následujících tabulkách jsou uvedeny vypočtené hodnoty modelu.

**Tabulka 8.11** Vypočtené hodnoty AC-DC difference (ppm)

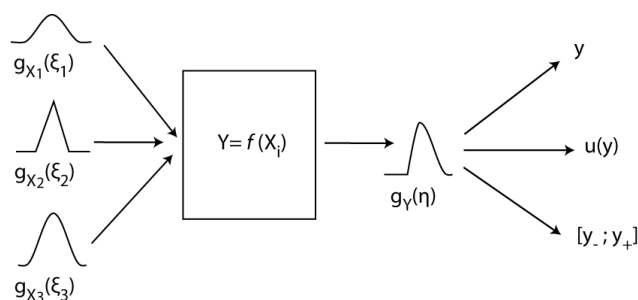
| Bočník-proud | Zátěž        | Frekvence (kHz) |   |   |    |    |     |     |
|--------------|--------------|-----------------|---|---|----|----|-----|-----|
|              |              | 0,5             | 1 | 5 | 10 | 20 | 50  | 100 |
| 30 mA        | 90 $\Omega$  | 0               | 1 | 6 | 12 | 24 | 64  | 136 |
|              | 1 M $\Omega$ | 1               | 2 | 9 | 19 | 39 | 103 | 227 |
|              | -            | 1               | 2 | 9 | 19 | 39 | 103 | 227 |
| 100 mA       | 90 $\Omega$  | 0               | 0 | 1 | 3  | 5  | 13  | 27  |
|              | 1 M $\Omega$ | 0               | 0 | 2 | 3  | 6  | 15  | 30  |
|              | -            | 0               | 0 | 2 | 3  | 6  | 15  | 30  |
| 300 mA       | 90 $\Omega$  | 0               | 0 | 1 | 1  | 2  | 5   | 10  |
|              | 1 M $\Omega$ | 0               | 0 | 1 | 1  | 2  | 5   | 10  |
|              | -            | 0               | 0 | 1 | 1  | 2  | 5   | 10  |
| 1 A          | 90 $\Omega$  | 0               | 0 | 0 | 1  | 2  | 4   | 7   |
|              | 1 M $\Omega$ | 0               | 0 | 0 | 1  | 2  | 4   | 7   |
|              | -            | 0               | 0 | 0 | 1  | 2  | 4   | 7   |
| 10 A         | 90 $\Omega$  | 0               | 0 | 0 | 0  | 0  | -4  | -18 |
|              | 1 M $\Omega$ | 0               | 0 | 0 | 0  | 0  | -4  | -19 |
|              | -            | 0               | 0 | 0 | 0  | 0  | -4  | -19 |

Tabulka 8.12 Vypočtené hodnoty fázové chyby ( $\mu\text{rad}$ )

| Bočník-proud | Zátěž         | Frekvence (kHz) |     |      |      |       |       |       |
|--------------|---------------|-----------------|-----|------|------|-------|-------|-------|
|              |               | 0,5             | 1   | 5    | 10   | 20    | 50    | 100   |
| 30 mA        | 90 $\Omega$   | -31             | -61 | -305 | -609 | -1218 | -3045 | -6089 |
|              | 50 k $\Omega$ | -46             | -93 | -463 | -926 | -1851 | -4628 | -9255 |
|              | -             | -46             | -93 | -463 | -927 | -1853 | -4632 | -9264 |
| 100 mA       | 90 $\Omega$   | -8              | -16 | -79  | -158 | -315  | -788  | -1576 |
|              | 50 k $\Omega$ | -7              | -15 | -74  | -147 | -294  | -736  | -1472 |
|              | -             | -7              | -15 | -74  | -147 | -294  | -736  | -1472 |
| 300 mA       | 90 $\Omega$   | -4              | -7  | -37  | -74  | -148  | -370  | -740  |
|              | 50 k $\Omega$ | -2              | -5  | -24  | -49  | -98   | -244  | -489  |
|              | -             | -2              | -5  | -24  | -49  | -98   | -244  | -489  |
| 1 A          | 90 $\Omega$   | -4              | -9  | -44  | -89  | -177  | -443  | -885  |
|              | 50 k $\Omega$ | -2              | -4  | -20  | -40  | -81   | -202  | -404  |
|              | -             | -2              | -4  | -20  | -40  | -81   | -202  | -403  |
| 10 A         | 90 $\Omega$   | 0               | 0   | -2   | -4   | -8    | -20   | -41   |
|              | 50 k $\Omega$ | 5               | 10  | 51   | 101  | 202   | 506   | 1011  |
|              | -             | 5               | 10  | 51   | 101  | 203   | 507   | 1013  |

### 8.3 Výpočet nejistot

Vzhledem ke složitosti výpočtu impedance bočníků (a následně jejich AC-DC diferencí a fázových chyb) ze značného počtu vstupních veličin daných rozměry a materiálovými vlastnostmi DPS a vlastnostmi použitých rezistorů by klasický výpočet nejistot podle Směrnice pro vyjádření nejistoty měření ("Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", GUM) [70] byl velmi složitý. Proto byla pro výpočet nejistot využita metoda Monte Carlo (MC), která je alternativní metodou pro vyhodnocení nejistot měření a je popsána v dodatku č. 1 ke GUM [71].



Obrázek 8.9 Princip MC metody

Postup výpočtu nejistot měření metodou Monte Carlo (viz obrázek 8.9) je následující [71]:

- vytvoření matematického modelu děje  $Y = f(X)$ ,
- určení nejistot a rozložení vstupních veličin,
- provedení dostatečného počtu simulací,

- zpracování výpočetních hodnot stochastickými metodami a určení nejpravděpodobnější hodnoty  $y$  a nejistoty  $u(y)$ .

### 8.3.1 Vytvoření matematického modelu děje

Matematický model děje popisuje obecně výpočet výstupní veličiny pomocí veličin vstupních a při výpočtu nejistot je využíván k simulacím tohoto děje. V našem případě je to výpočet impedance, AC-DC difference a fázové chyby bočníku pomocí matematického modelu popsaného v kapitole 8.1.1 ze vstupních veličin vzešlých z konstrukce bočníku popsaných v kapitole 8.1.1.1.

### 8.3.2 Určení nejistot a rozložení vstupních veličin

Před zahájením simulací je nezbytné stanovit nejistoty vstupních veličin a jejich rozdělení. Na jejich základě totiž potom bude prováděno náhodné generování vstupních veličin pro simulace.

Co se týká vlastností DPS, nejistota relativní permitivity FR4 a ztrátového činitele FR4 byla stanovena z měření popsaných v kapitole 8.2.1.1, stejně tak byla určena i nejistota měrné vodivosti mědi. Nejistoty parametrů rezistorů odvozené z měření jsou uvedeny v tabulce 8.2 v kapitole 8.2.1.2. U těchto vstupních veličin bylo stanoveno normální rozdělení

Přehled vstupních veličin, u kterých se předpokládá rovnoměrné rozdělení, je uveden v tabulce 8.13 spolu s intervaly hodnot, kterých mohou nabývat (horní a dolní mez). U geometrických rozměrů je horní a dolní mez intervalu dána základní přesností fréz, které byly pro výrobu dílů použity. Interval hodnot u relativní permeability a relativní permitivity teflonu a vzduchu a měrná vodivost hliníku byl odhadnut na základě odlišností údajů z různých fyzikálních tabulek. Horní a dolní mez tloušťky FR4 a Cu vrstvy byly stanoveny na základě údajů výrobce DPS (viz katalogové listy v příloze č. 3 na CD).

Nejistota permitivity  $\epsilon_0$  a permeability  $\mu_0$  vakua je zanedbána, stejně tak nejistota počtu příček  $n_b$  a počtu rezistorů  $n_r$ .

**Tabulka 8.13** Intervaly hodnot vstupních veličin s rovnoměrným rozdělením

| Konstrukční část | Vstupní veličina                               | Symbol              | Interval hodnot   |
|------------------|------------------------------------------------|---------------------|-------------------|
| Konektor N, UHF  | Vnitřní průměr                                 | $r_{1c}$            | $\pm 0,0001$ m    |
|                  | Vnější průměr                                  | $r_{2c}$            | $\pm 0,0001$ m    |
|                  | Délka se vzduchovou mezerou                    | $l_{ca}$            | $\pm 0,00005$ m   |
|                  | Délka s teflonovým dielektrikem                | $l_{ct}$            | $\pm 0,0005$ m    |
|                  | Vodivost vnitřního vodiče (stříbro)            | $\sigma_c$          | $\pm 0,4e6$ S/m   |
|                  | Vodivost vnitřního vodiče (zlato)              | $\sigma_c$          | $\pm 1,6e6$ S/m   |
|                  | Relativní permitivita vzduchu                  | $\varepsilon_{rca}$ | $\pm 0,00004$     |
|                  | Relativní permitivita teflonu                  | $\varepsilon_{rct}$ | $\pm 0,4$         |
|                  | Relativní permeabilita                         | $\mu_r$             | $\pm 0,00005$     |
|                  |                                                |                     |                   |
| Vlastnosti DPS   | Tloušťka                                       | $d_{FR4}$           | $\pm 0,0005$ m    |
|                  | Tloušťka Cu vrstvy                             | $t_{Cu}$            | $\pm 0,0000005$ m |
|                  | Relativní permeabilita                         | $\mu_r$             | $\pm 0,00005$     |
| Vstupní desky    | Rozměr desky                                   | $l_d$               | $\pm 0,0003$ m    |
|                  | Vnitřní poloměr kruhu otvorů příček            | $r_{c2}$            | $\pm 0,0001$ m    |
|                  | Vnější poloměr kruhu otvorů příček             | $r_{c3}$            | $\pm 0,0001$ m    |
| Příčky           | Šířka příčky                                   | $w_b$               | $\pm 0,0003$ m    |
|                  | Délka příčky                                   | $l_b$               | $\pm 0,0003$ m    |
|                  | Délka zúžené části příčky                      | $l_{br1}$           | $\pm 0,0003$ m    |
|                  | Délka širší části příčky                       | $l_{br2}$           | $\pm 0,0003$ m    |
| Výstupní část    | Rozměr desky                                   | $l_d$               | $\pm 0,0003$ m    |
|                  | Vnitřní poloměr kruhu                          | $r_{c1}$            | $\pm 0,0001$ m    |
|                  | Vnitřní poloměr kruhu otvorů příček            | $r_{c2}$            | $\pm 0,0001$ m    |
|                  | Vnější poloměr kruhu otvorů příček             | $r_{c3}$            | $\pm 0,0001$ m    |
|                  | Velikost vzduchové mezery mezi kruhem a deskou | $d_a$               | $\pm 0,0006$ m    |
|                  | Délka drátku                                   | $l_w$               | $\pm 0,0006$ m    |
|                  | Poloměr drátku                                 | $r_w$               | $\pm 0,00005$ m   |
|                  | Vodivost hliníku                               | $\sigma_w$          | $\pm 0,2e7$ S/m   |

### 8.3.3 Provedení dostatečného počtu simulací

Provedení jedné simulace znamená výpočet odhadu výstupní veličiny pro jeden vygenerovaný vektor odhadů vstupních veličin.

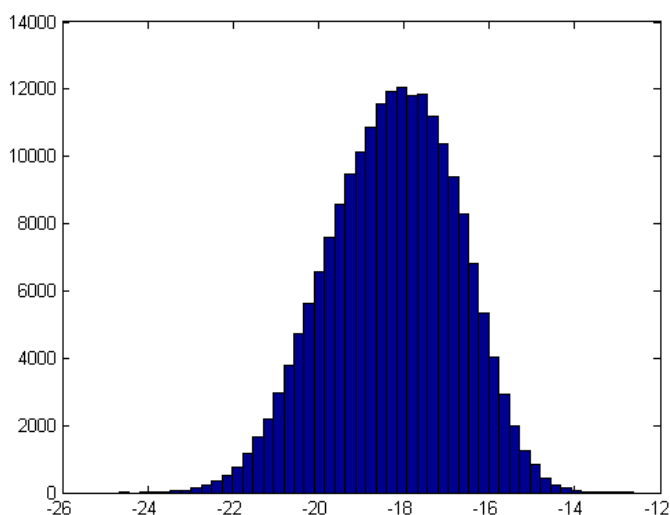
Generování vstupních veličin probíhá pomocí generátorů náhodných čísel. Základní generátory používané pro generování vstupních veličin v Matlabu jsou *normrnd()* pro normální rozdělení a *unifrnd()* pro rovnoměrné rozdělení.

Pro generování odhadů vstupních veličin byla v Matlabu napsána funkce *gen\_dis()* sdružující generování vektoru hodnot jak pro normální, tak i pro rovnoměrné rozdělení. Pro každou sadu (vektor) takto vygenerovaných odhadů vstupních veličin je pak spočítán odhad veličiny výstupní přímo v hlavním skriptu jednotlivých bočníků.

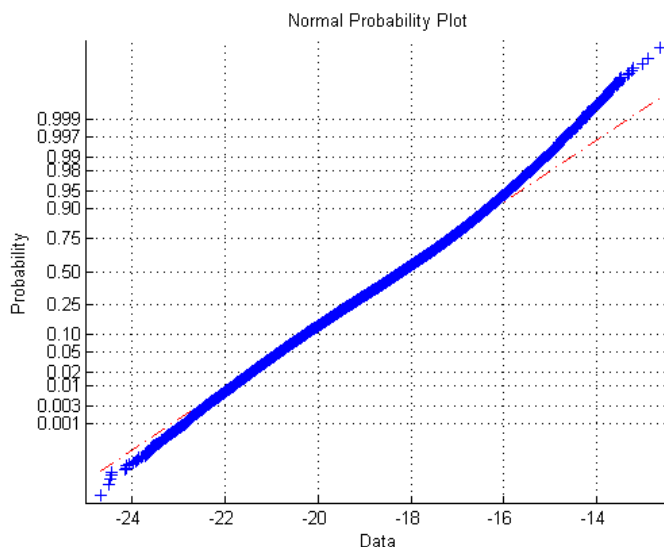
Odpovídající počet simulací závisí na několika faktorech, zejména na počtu míst, na která má být nejistota počítána (jedno nebo dvě?), tvaru pravděpodobnostní distribuční funkce výstupní veličiny (lze stanovit rozložení výstupní veličiny?) a na velikosti pravděpodobnosti pokrytí (obvykle  $\geq 95\%$ ). Pro výpočet nejistot analytického modelu na dvě platná místa pro 95% pravděpodobnost vyšel minimální počet simulací výpočtu AC-DC difference na  $M = 3e5$  a fázové chyby na  $M = 1e6$ , u 30mA bočníku na  $M = 3e6$ .

### 8.3.4 Zpracování výpočetních hodnot, určení nejpravděpodobnější hodnoty a nejistoty

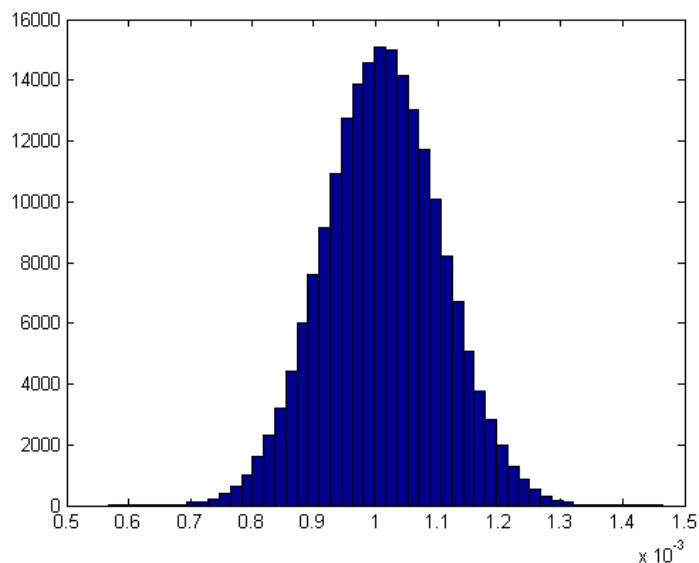
Po provedení simulací jsou vypočtené odhady výstupní veličiny rozříděny dle velikosti a tak je získána diskretní reprezentace distribuční funkce. V následujících grafech jsou uvedeny histogramy a distribuční funkce spočítaných dat (odhadů) AC-DC difference a fázové chyby pro 10 A bočník, pro ostatní bočníky je tvar distribuční funkce obdobný. Výsledné rozložení AC-DC difference a fázové chyby je tedy normální, což vzhledem k velkému počtu vstupních veličin bývá obvyklé.



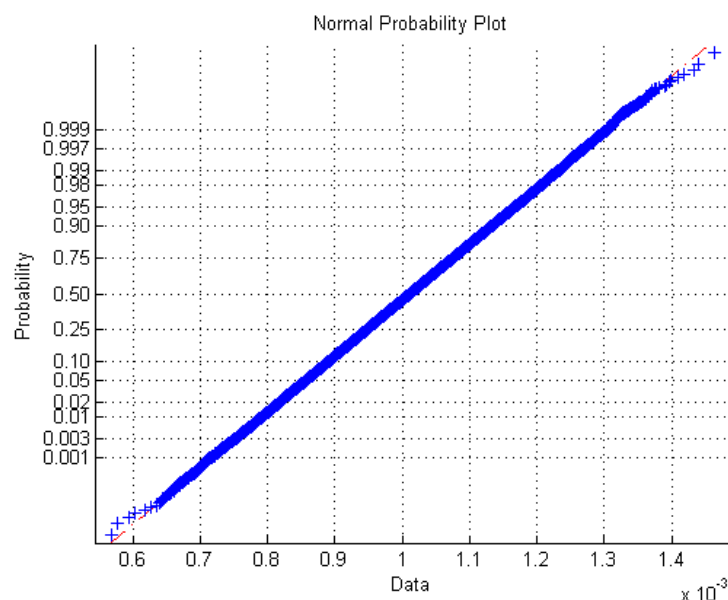
Obrázek 8.10 Histogram dat AC-DC difference na 100 kHz 10 A bočníku,  $M = 2e5$



Obrázek 8.11 Distribuční funkce AC-DC difference na 100 kHz 10 A bočníku,  $M = 2e5$



**Obrázek 8.12** Histogram dat fázové chyby na 100 kHz 10 A bočníku,  $M = 2e5$



**Obrázek 8.13** Distribuční funkce fázové chyby na 100 kHz 10 A bočníku,  $M = 2e5$

Nejpravděpodobnější hodnota výstupní veličiny se určuje jako průměr ze všech vypočítaných odhadů a její standardní nejistota je pak dána směrodatnou odchylkou. K tomu lze v Matlabu využít kromě předdefinovaných funkcí *mean()* a *std()* také v případě normálního rozdělení výstupní veličiny funkci *normfit()*, která mimo průměru a směrodatné odchylky počítá i interval pokrytí pro pravděpodobnost 95 % a která byla nakonec použita při výpočtech nejistot modelu bočnicků.

V následujících tabulkách jsou uvedeny vypočtené nejpravděpodobnější hodnoty AC-DC difference a fázové chyby (průměrné hodnoty) a jejich standardní nejistoty (směrodatné odchylky) pro jednotlivé bočníky.

**Tabulka 8.14** Vypočtené průměrné hodnoty AC-DC difference a jejich směrodatné odchylky pro zátěž 90  $\Omega$

| Bočník-<br>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 8.15** Vypočtené průměrné hodnoty fázové chyby a jejich směrodatné odchylky pro zátěž 50 k $\Omega$

| Bočník-<br>proud |                   | Frekvence (kHz) |       |       |       |       |       |       |
|------------------|-------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  |                   | 0,5             | 1     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| 30 mA            | Fáze ( $\mu$ rad) | -46,4           | -92,9 | -464  | -929  | -1857 | -4643 | -9285 |
|                  | Smd.odch          | 3,2             | 6,4   | 32    | 64    | 127   | 318   | 636   |
| 100 mA           | Fáze ( $\mu$ 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 ( $\mu$ 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 ( $\mu$ 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 ( $\mu$ rad) | 5,06            | 10,11 | 50,6  | 101   | 202   | 506   | 1011  |
|                  | Smd.odch          | 0,47            | 0,95  | 4,7   | 9,5   | 19    | 47    | 95    |

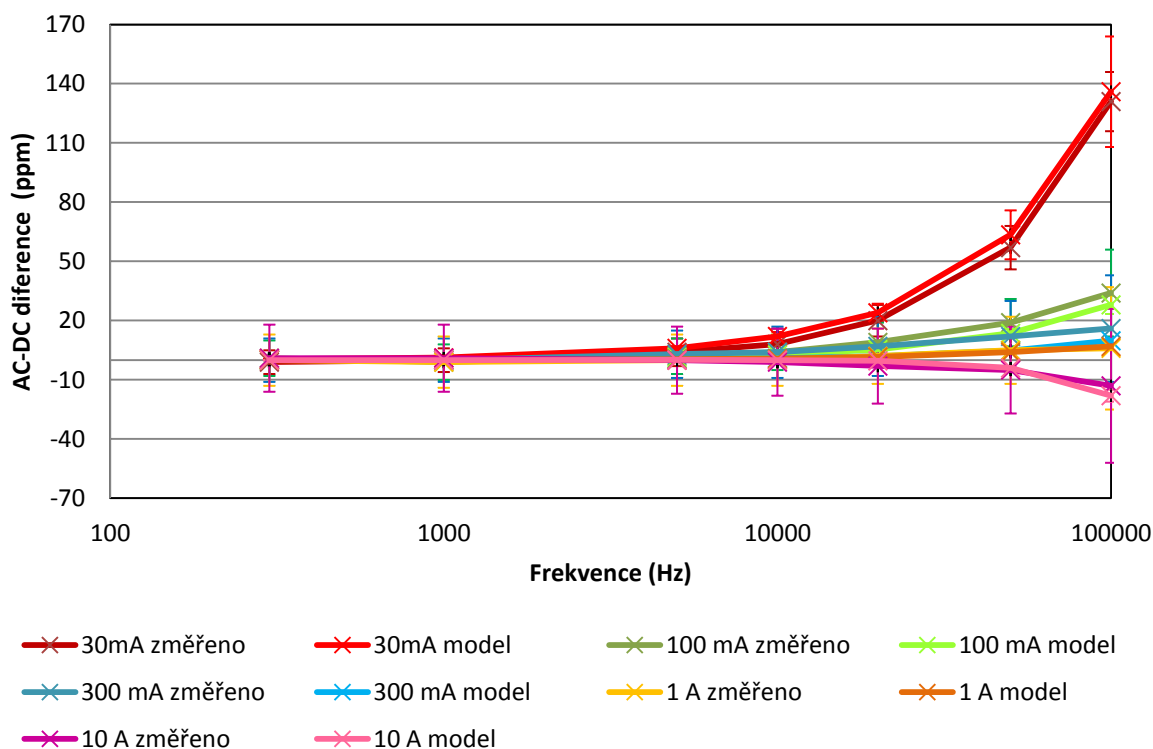
## 8.4 Verifikace modelu

### 8.4.1 Verifikace AC-DC difference

AC-DC difference bočníků byla změřena na pracovišti pro měření AC-DC difference proudu, kdy AC-DC difference proudu procházejícího bočníkem byl měřen příslušným etalonem stupnice AC-DC difference proudů (tvořeného planárním termokonvertorem s bočníkem). Výsledky jsou uvedeny v tabulce 7.2.

Protože během měření byl výstup bočníku zatížen vstupní impedancí použitého termokonvertoru (90  $\Omega$ ), bylo nezbytné při verifikaci vypočítaných hodnot uvažovat hodnoty AC-DC difference vypočítané pro tuto zátěž. Tyto jsou uvedeny v tabulce 8.15.

V následujícím grafu je vidět porovnání naměřených hodnot AC-DC difference s vypočtenými. Shoda je v rámci nejistot měření u všech bočníků. Maximální odchylka je 7 ppm pro 300 mA bočník na 50 kHz.

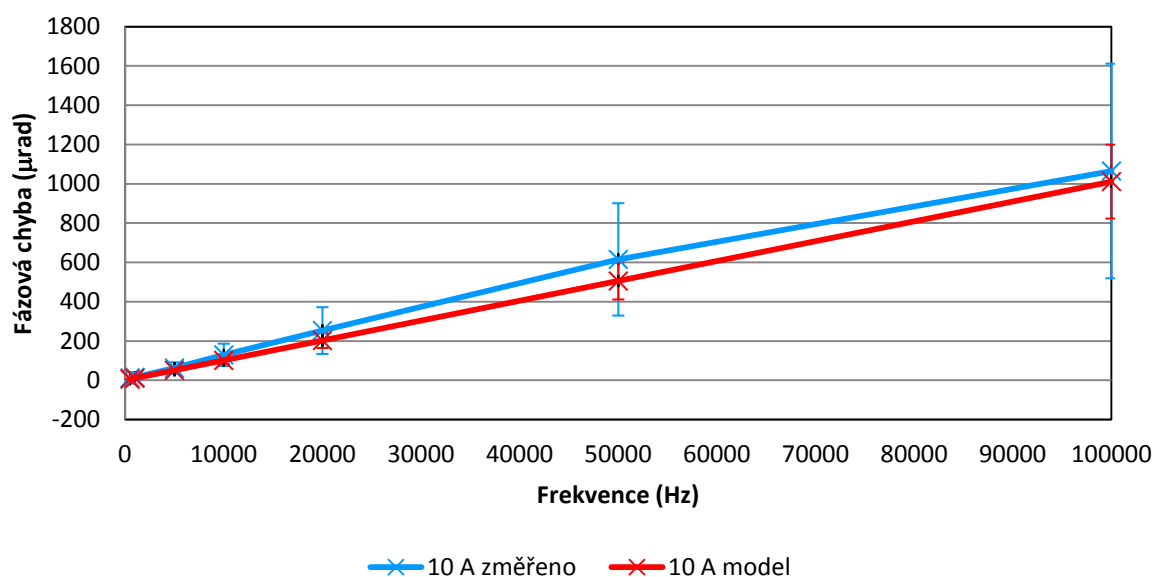


Obrázek 8.14 Porovnání vypočtených a naměřených AC-DC diferencí bočníků při zátěži 90  $\Omega$

## 8.4.2 Verifikace fázové chyby

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 ze sady vyvinuté v ČMI (viz kapitola 7.3) [67]. Při měření byly bočníky zatíženy transformátory s aktivním stíněním (AGT) se vstupní impedancí 50 k $\Omega$ . Pro verifikaci modelu byly proto použity hodnoty fázové chyby vypočítané pro tuto zátěž uvedené v tabulce 8.16.

V následujícím grafu je vidět porovnání naměřených hodnot fázové chyby s vypočtenými. Shoda je v rámci nejistot měření, maximální odchylka je 110  $\mu$ rad na 50 kHz.



Obrázek 8.15 Porovnání vypočtených a naměřených hodnot fázové chyby bočníku 10 A při zátěži 50 k $\Omega$

## 9. 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 difference 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.

### 9.1 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).

#### 9.1.1 Vstupní veličiny neovlivňující vlastnosti bočníku

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.

Parametrická simulace tloušťky Cu vrstvy použitých DPS byla provedena v rozsahu běžně vyráběných DPS, tedy 105  $\mu\text{m}$ , 70  $\mu\text{m}$ , 35  $\mu\text{m}$  a 18  $\mu\text{m}$ .

Měrná vodivost použitých materiálů (Cu, Au, Al) byla zvýšena a snížena o 10 %, výsledky simulace však vliv na frekvenční charakteristiku neukázaly.

U bočníků mohou být použity také různé konektory. Zatímco typ výstupního konektoru je shodný u všech NMI a používá se typ N, typ vstupního konektoru závisí také na proudu, který jím bude protékat. Obvykle se pro malé proudy používá typ N (obvykle do 10 A), pro střední proudy typ UHF (obvykle do 20 A) a pro velké proudy typ LC (nad 20 A). V hraničních oblastech malých/středních/velkých proudů lze tak použít dva různé typy konektorů, např. pro 10 A typ N i UHF. Proto byly provedeny simulace sledující vliv typu vstupního konektoru 10 A bočníku na jeho frekvenční charakteristiky. Vzhledem k podobným rozměrům a některým použitým materiálům (např. teflon jako izolace) je vliv na frekvenční charakteristiku bočníku nevýznamný.

Relativní permeabilita prostředí je vzhledem ke zvolené konstrukci a materiálům vždy přibližně rovna jedné a její parametrická simulace nemá smysl.

## 9.1.2 Vstupní veličiny ovlivňující vlastnosti bočníku

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

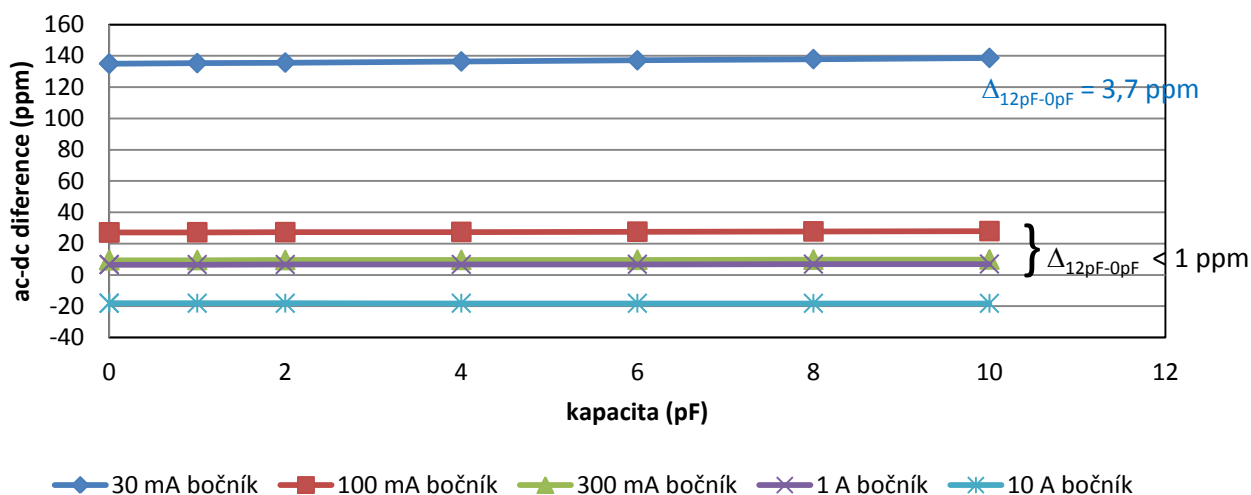
- parazitní kapacita a indukčnost použitých rezistorů,
- relativní permitivita DPS,
- ztrátový činitel DPS,
- tloušťka DPS,
- šířka a délka příček,
- změny rozměrů desek/ kruhu a počtu příček.

Dále jsou uvedeny parametrické simulace vlivu těchto vstupních veličin na AC-DC diferenci a fázovou chybu bočníků. Vzhledem k tomu, že největší změny ve frekvenční charakteristice a tedy v AC-DC diferenci a fázové chybě lze očekávat na vyšších frekvencích, jsou níže diskutované výsledky parametrických simulací uváděny zejména s ohledem na změny frekvenční charakteristiky na 100 kHz, v příloze č. 4 na CD jsou pak uvedeny výsledky simulací pro celý frekvenční rozsah 10 Hz – 100 kHz.

### 9.1.2.1 Parametrická simulace vlivu parazitní kapacity použitých rezistorů

Parazitní kapacita použitých rezistorů byla postupně měněna v rozsahu od 10 fF (téměř nula) do 10 pF. Vektor simulovaných vstupních kapacit byl: 10 fF – 1 pF – 2 pF – 4 pF – 6 pF – 8 pF – 10 pF, přičemž hodnota 2 pF je parazitní kapacita rezistorů, které jsou nyní v bočnících osazeny.

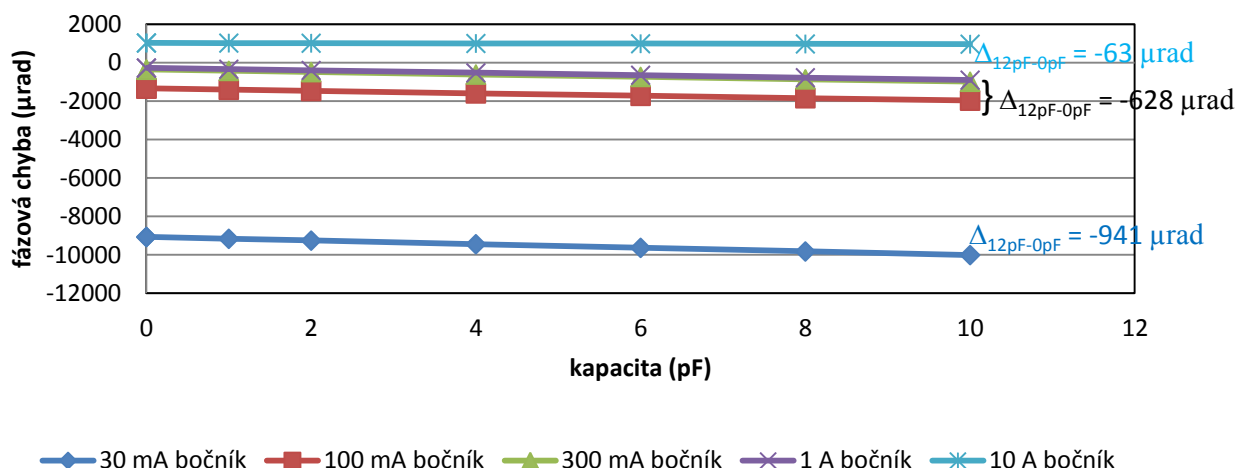
Na obrázku 9.1 je uvedena závislost AC-DC difference na změně kapacity na frekvenci 100 kHz, ze které vyplývá, že změna AC-DC difference je pro bočníky 30 mA až 1 A nevýznamná (menší než 1 ppm) a pro 10A bočník došlo k malé změně o +3,7 ppm v simulovaném rozsahu hodnot parazitní kapacity.



Obrázek 9.1 Závislost AC-DC difference na změně kapacity rezistorů,  $f = 100$  kHz

Na obrázku 9.2 je zobrazena závislost fázové chyby na změně kapacity pro frekvenci 100 kHz, kde již došlo k významným změnám velikosti fázové chyby. Největší změna byla u 30mA bočníku, kde se fázová chyba změnila v simulovaném rozsahu hodnot parazitní kapacity o -934  $\mu$ rad, u bočníků 100 mA až 1 A pak o -628  $\mu$ rad. Vzhledem k záporné fázové chybě těchto bočníků je tedy žádoucí co nejmenší parazitní kapacita rezistorů. Naopak 10A

bočník má kladnou fázovou chybu, která v rozsahu simulovaných hodnot klesala s rostoucí kapacitou (až o  $-63\mu\text{rad}$ ).

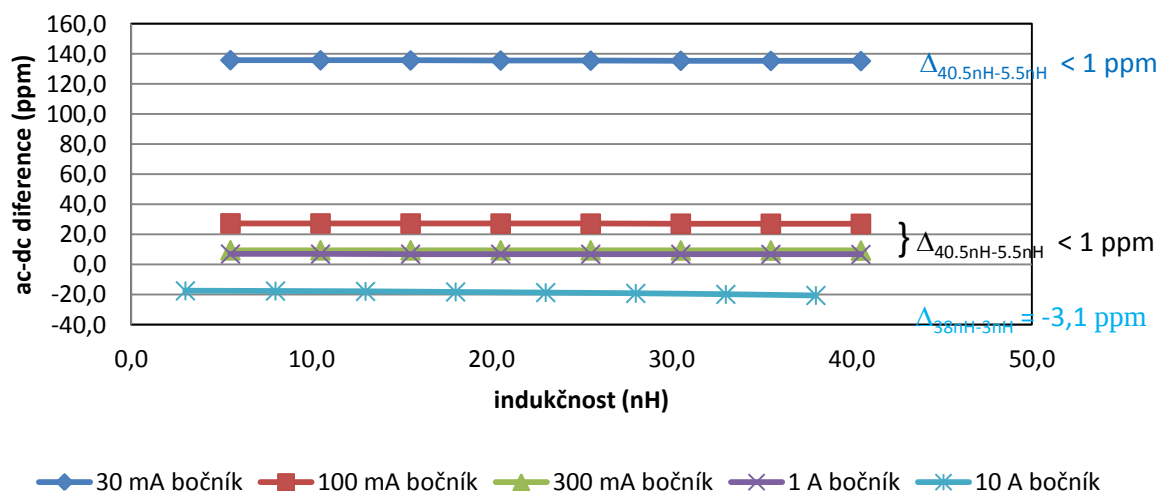


Obrázek 9.2 Závislost fázové chyby na změně kapacity rezistorů,  $f = 100\text{ kHz}$

### 9.1.2.2 Parametrická simulace vlivu parazitní indukčnosti použitých rezistorů

Parazitní indukčnost použitých rezistorů byla postupně měněna v rozsahu od  $3\text{ nH}$  do  $40,5\text{ nH}$ . Vektor simulovaných vstupních hodnot pro bočníky  $30\text{ mA}$  až  $1\text{ A}$  byl:  $5,5\text{ nH} - 10,5\text{ nH} - 15,5\text{ nH} - 20,5\text{ nH} - 25,5\text{ nH} - 30,5\text{ nH} - 35,5\text{ nH} - 40,5\text{ nH}$ , přičemž hodnota  $20,5\text{ nH}$  je parazitní indukčnost rezistorů, které jsou nyní v bočnicích osazeny (resp.  $20\text{ nH}$  u  $30\text{ mA}$  bočníku). Pro bočník  $10\text{ A}$  byl zvolen vektor hodnot  $3\text{ nH} - 8\text{ nH} - 13\text{ nH} - 18\text{ nH} - 23\text{ nH} - 28\text{ nH} - 33\text{ nH} - 38\text{ nH}$ , kdy hodnota  $18\text{ nH}$  je indukčnost rezistorů použitých v současné době.

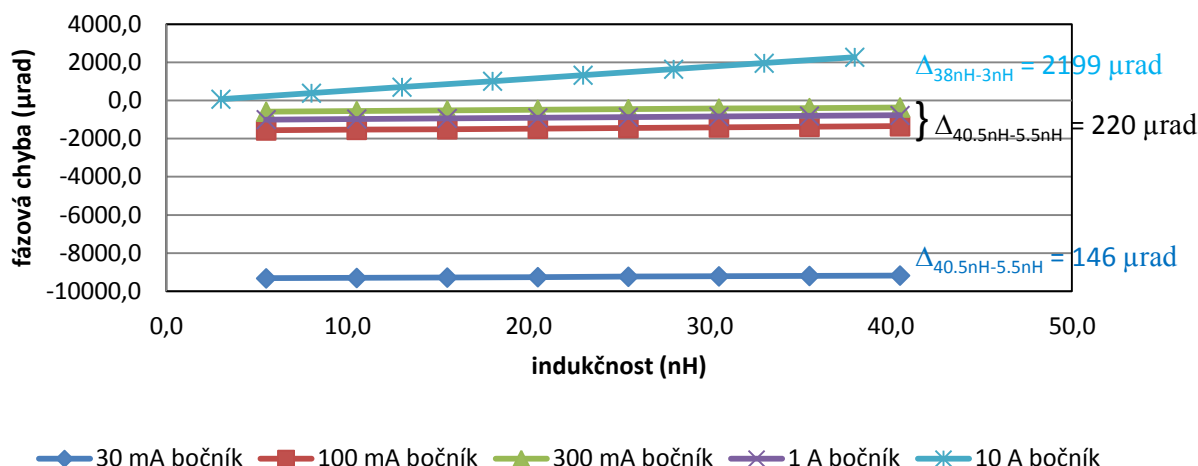
Na obrázku 9.3 je uvedena závislost AC-DC difference na změně indukčnosti na frekvenci  $100\text{ kHz}$ , ze které vyplývá, že změna AC-DC difference je pro bočníky  $30\text{ mA}$  až  $1\text{ A}$  nevýznamná (menší než  $1\text{ ppm}$ ) a pro  $10\text{ A}$  bočník došlo k malé změně o  $-3,1\text{ ppm}$  v simulovaném rozsahu hodnot indukčnosti.



Obrázek 9.3 Závislost AC-DC difference na změně indukčnosti rezistorů,  $f = 100\text{ kHz}$

Naopak z grafu na obrázku 9.4 vyplývá, že změna fázové chyby bočníků je na změně indukčnosti závislá významně. U bočníků  $30\text{ mA}$  až  $1\text{ A}$  fázová chyba klesala s rostoucí indukčností ( $30\text{ mA}$  bočníku o  $146\mu\text{rad}$ , u bočníků  $100\text{ mA}$  až  $1\text{ A}$  pak o  $220\mu\text{rad}$  ve sledovaném rozsahu hodnot indukčnosti). Naopak u  $10\text{ A}$  s rostoucí indukčností rostla i fázová

chyba, změna ve sledovaném rozsahu hodnot indukčnosti byla nejvýznamnější a to 2199  $\mu\text{rad}$ .

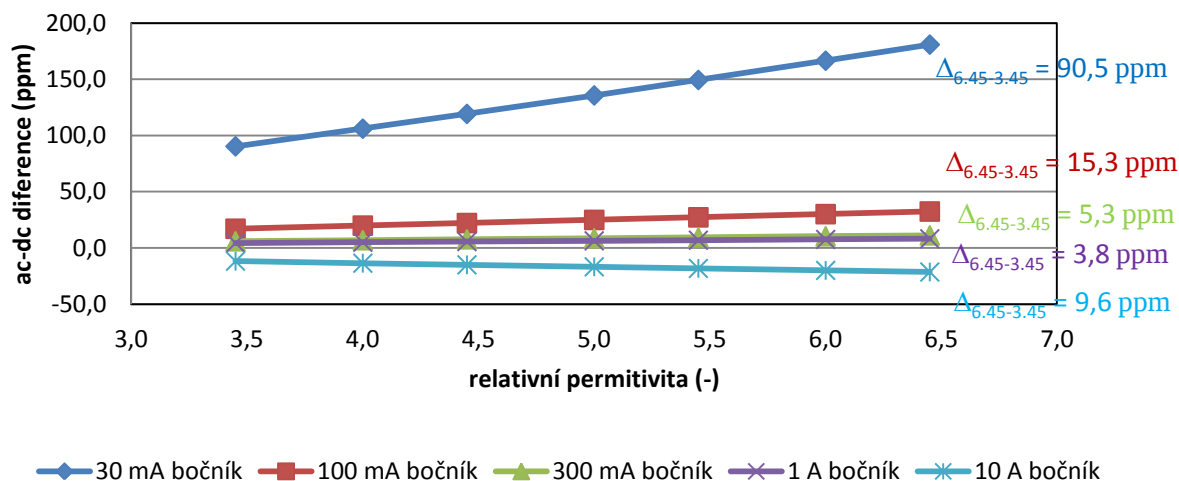


Obrázek 9.4 Závislost fázové chyby na změně indukčnosti rezistorů,  $f = 100 \text{ kHz}$

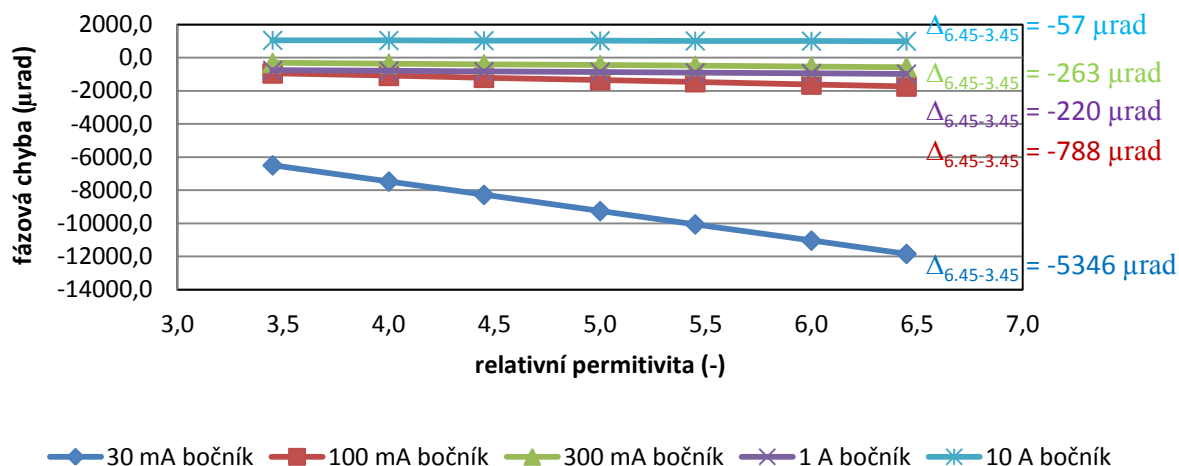
### 9.1.2.3 Parametrická simulace vlivu relativní permitivity DPS

Parametrická simulace vlivu relativní permitivity na AC-DC diferenci a fázovou chybu bočníků byla provedena v rozsahu hodnot od 3,45 do 6,45, kdy 5 je relativní permitivita DPS použité pro stavbu 30mA bočník a 5,45 je relativní permitivity DPS použité u ostatních bočníků.

Z grafů na obrázcích 9.5 a 9.6 vyplývá, že změna relativní permitivity použité DPS způsobí významnou změnu AC-DC difference i fázové chyby bočníků. Nejvíce pak u 30mA bočníku, kde AC-DC difference s rostoucí permitivitou vzrostla o 90,5 ppm a fázová chyba o 5346  $\mu\text{rad}$  v simulovaném rozsahu hodnot relativní permitivity. Nejmenší změna AC-DC difference byla u 1A bočníku a to vzrůst o 3,8 ppm, nejmenší změna fázové chyby pak u 10A bočníku, kdy klesla o 57  $\mu\text{rad}$  ve sledovaném rozsahu hodnot relativní permitivity DPS.



Obrázek 9.5 Závislost AC-DC difference na změně relativní permitivity DPS,  $f = 100 \text{ kHz}$



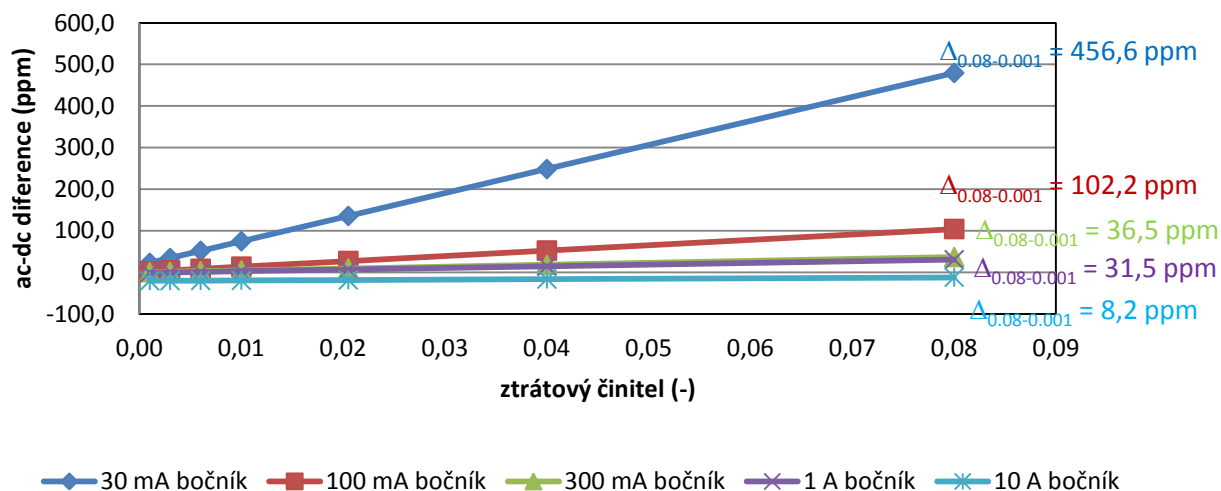
Obrázek 9.6 Závislost fázové chyby na změně relativní permitivity DPS,  $f = 100 \text{ kHz}$

#### 9.1.2.4 Parametrická simulace vlivu ztrátového činitele DPS

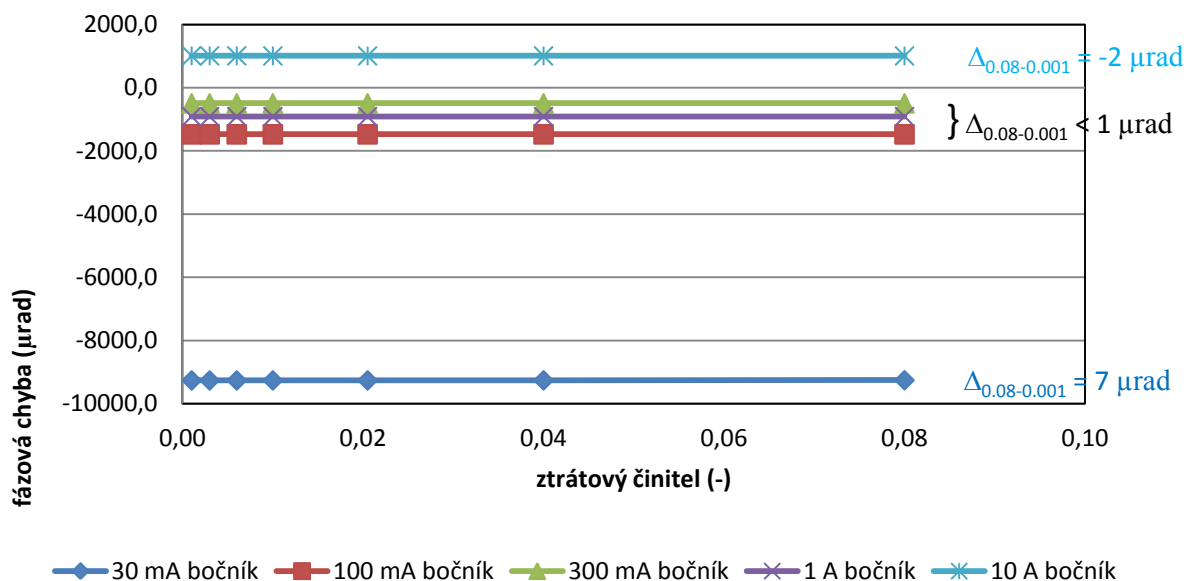
Vliv ztrátového činitele DPS na AC-DC diferenci a fázovou chybu bočníků byl zkoumán v rozsahu 0,001 až 0,08, přičemž ztrátový činitel DPS použitých k výrobě stávajících bočníků je 0,0205.

Z grafů na obrázcích 9.7 a 9.8 je vidět, že ztrátový činitel ovlivňuje významně pouze AC-DC diferenci, kdežto fázová chyba bočníků zůstává téměř stejná.

Změna AC-DC difference byla největší pro 30mA bočník, kdy vzrostla o 456,6 ppm, a nejmenší pro 10A bočník, kdy naopak klesla z -20,2 ppm na -12,0 ppm ve sledovaném rozsahu hodnot ztrátového činitele.



Obrázek 9.7 Závislost AC-DC difference na změně ztrátového činitele DPS,  $f = 100 \text{ kHz}$

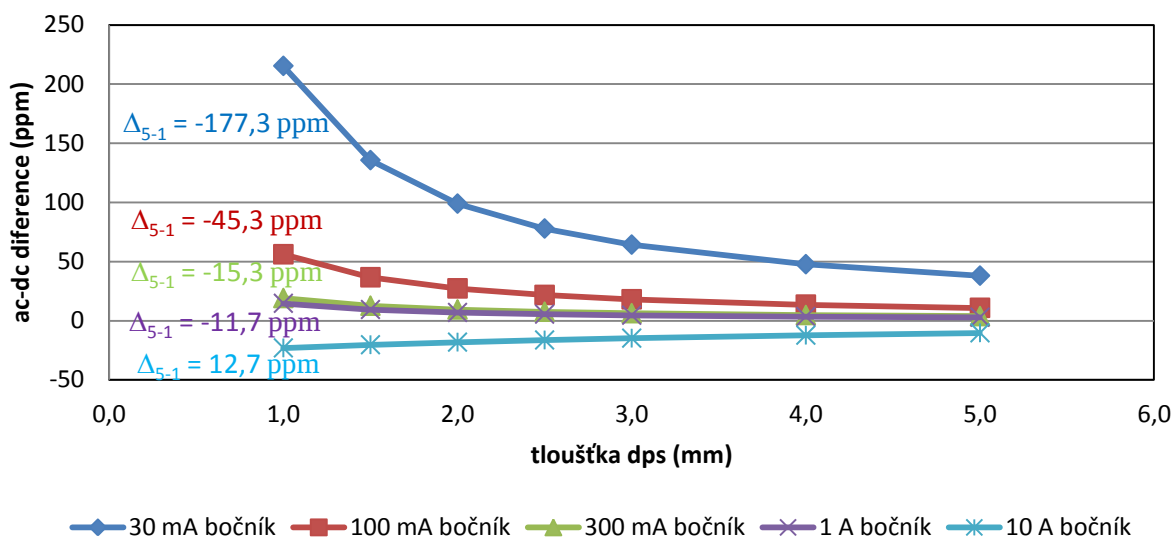


Obrázek 9.8 Závislost fázové chyby na změně ztrátového činitele DPS,  $f = 100 \text{ kHz}$

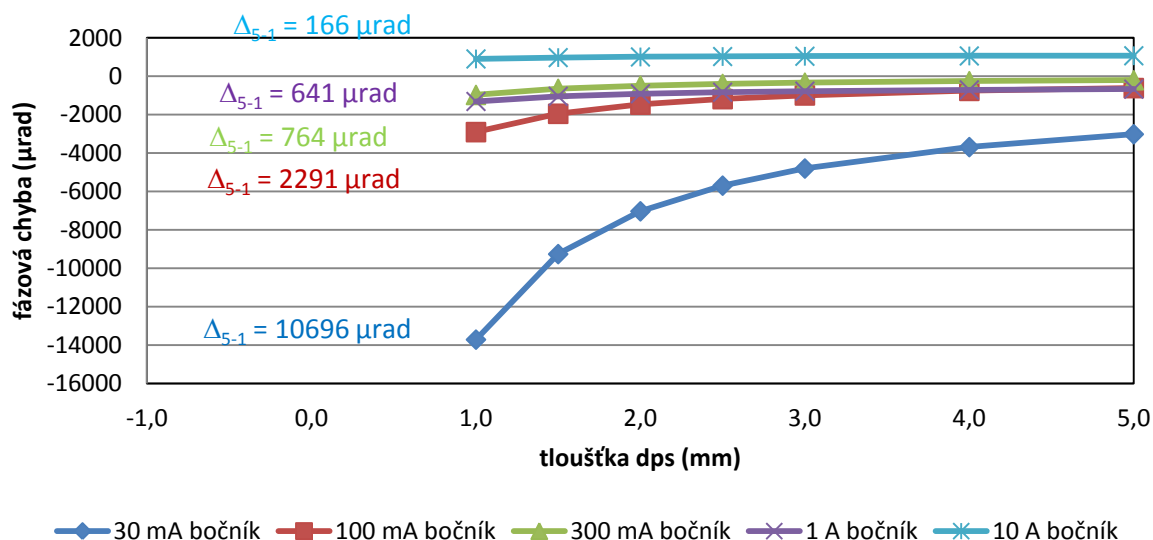
#### 9.1.2.5 Parametrická simulace vlivu tloušťky DPS

Simulace vlivu tloušťky DPS na AC-DC diferenci a fázovou chybu bočnicků byla provedena v rozsahu hodnot od 1 mm do 5 mm (což mohou být dvě k sobě přiložené DPS tloušťky 2,5 mm), kdy 1,5 mm je tloušťka DPS použité pro stavbu 30mA bočníku a 2 mm je tloušťka DPS použité u ostatních bočnicků.

Z grafů na obrázcích 9.9 a 9.10 vyplývá, že změna tloušťky použité DPS způsobí významnou změnu AC-DC difference i fázové chyby bočnicků. Nejvíce pak u 30mA bočníku, kde AC-DC difference s rostoucí tloušťkou klesla o 177,3 ppm a fázová chyba o 10,97 mrad v simulovaném rozsahu hodnot. Nejméně se AC-DC difference změnila o -11,7 ppm (klesla) u 1A bočníku, fázová chyba pak o 166 μrad u 10A bočníku (vzrostla).



Obrázek 9.9 Závislost AC-DC difference na změně tloušťky DPS,  $f = 100 \text{ kHz}$

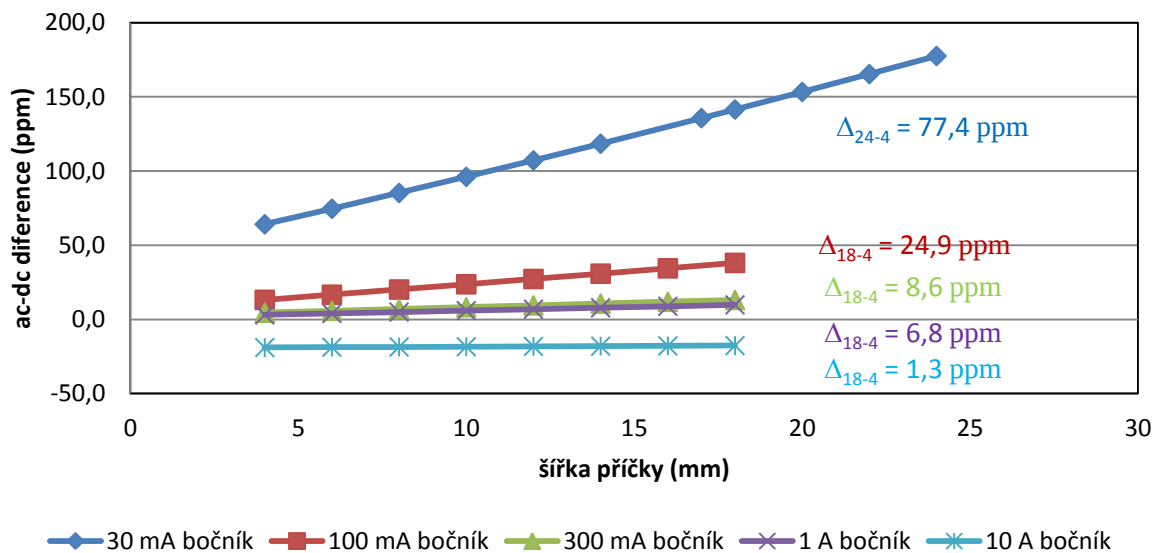


Obrázek 9.10 Závislost fázové chyby na změně tloušťky DPS,  $f = 100 \text{ kHz}$

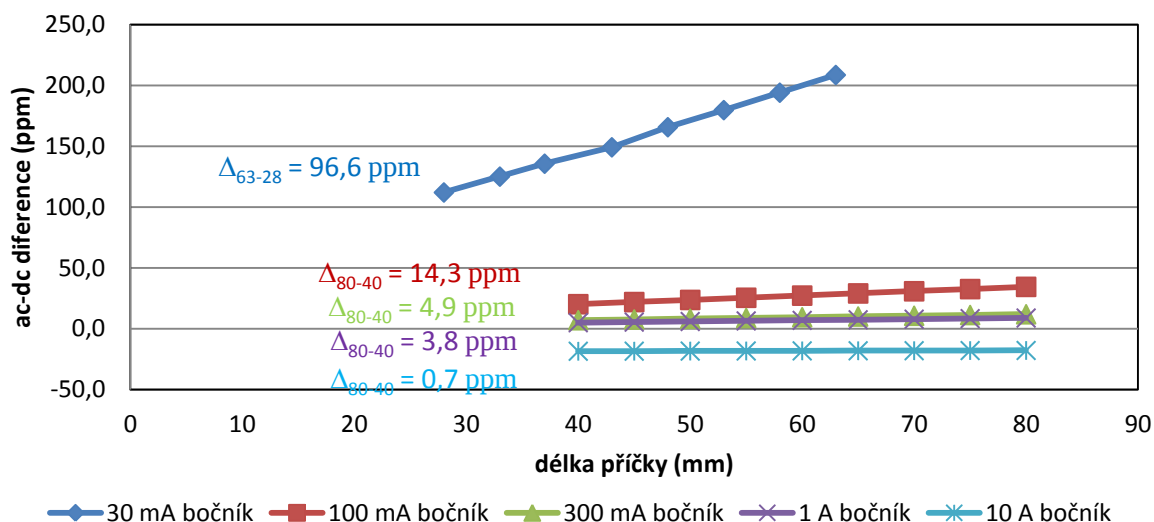
#### 9.1.2.6 Parametrická simulace vlivu rozměrů přiček

Dále byl sledován vliv změny šířky a délky přiček na frekvenční charakteristiku bočnicků. Šířka přiček byla měněna v rozsahu 4 mm až 24 mm pro 30mA bočník a 4 mm až 18 mm pro ostatní bočníky, délka přiček pak v rozsahu 28 mm až 63 mm pro 30mA bočník a 40 mm až 80 mm pro ostatní bočníky.

Na grafech na obrázcích 9.11 a 9.12 je zobrazen vliv šířky a délky přiček na AC-DC diferenci bočnicků na frekvenci 100 kHz. Je vidět, že vliv změny rozměrů přiček na AC-DC diferenci 10A bočnicku je zanedbatelný. Naopak u ostatních bočnicků je již významný, nejvíce pak u 30mA bočnicku, kdy s rostoucí šířkou vzrostla AC-DC diference o 77,4 ppm a s rostoucí délkou o 96,6 ppm ve sledovaném rozsahu.



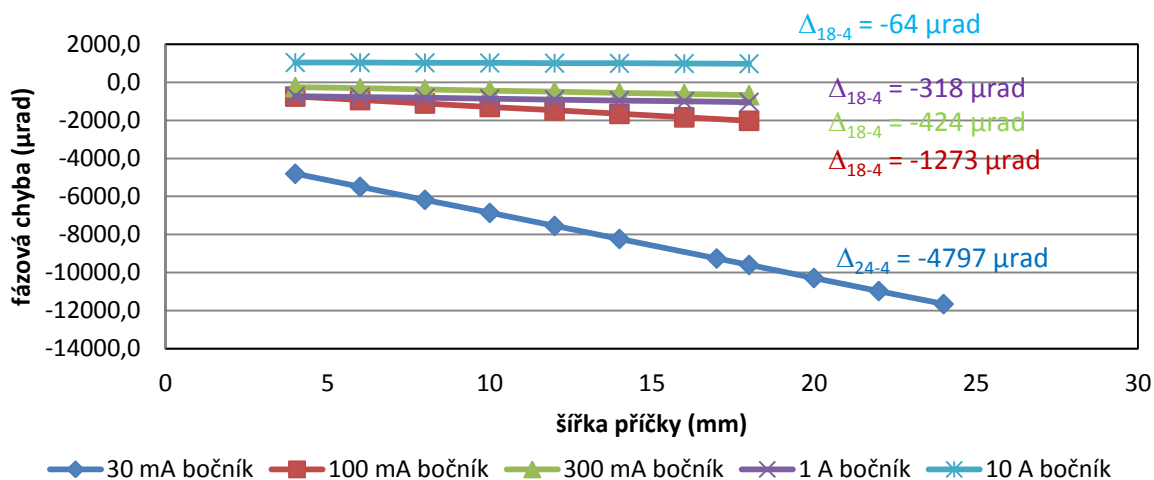
Obrázek 9.11 Závislost AC-DC difference na změně šířky přičky,  $f = 100 \text{ kHz}$



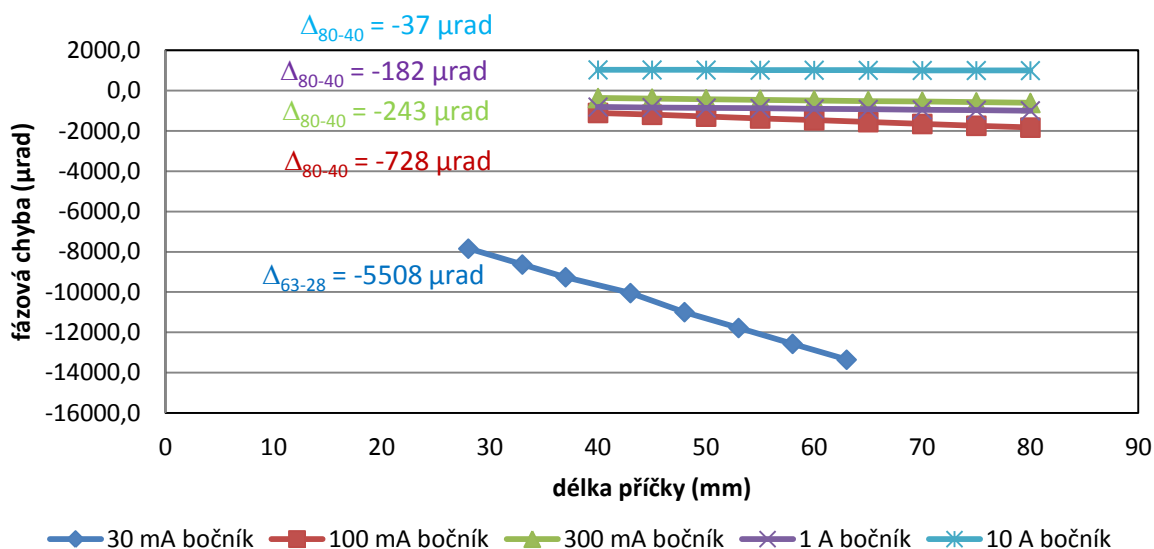
Obrázek 9.12 Závislost AC-DC difference na změně délky příčky,  $f = 100 \text{ kHz}$

Na grafech na obrázcích 9.13 a 9.14 je zobrazen vliv šířky a délky příček na fázovou chybu bočnicků na frekvenci 100 kHz.

Podobně jako u AC-DC difference je i u fázové chyby 10A bočnicku vliv rozměrů příček minimální. Největší vliv na fázovou chybu se opět ukázal u 30mA bočnicku, kde s rostoucí šířkou fázová chyba vzrostla o 4,8 mrad a s rostoucí délkou o 5,5 mrad ve sledovaném rozsahu hodnot rozměrů příček.



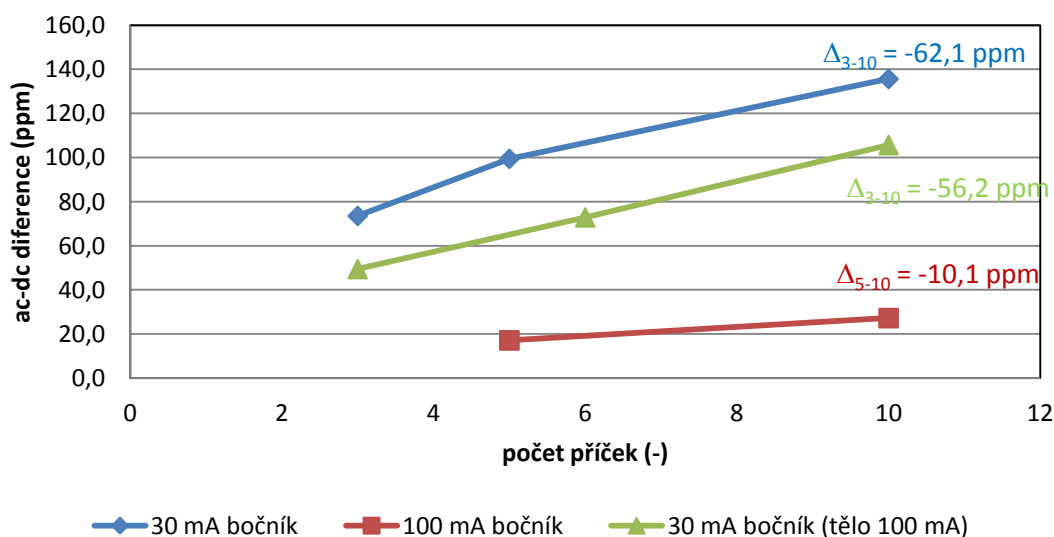
Obrázek 9.13 Závislost fázové chyby na změně šířky příčky,  $f = 100 \text{ kHz}$



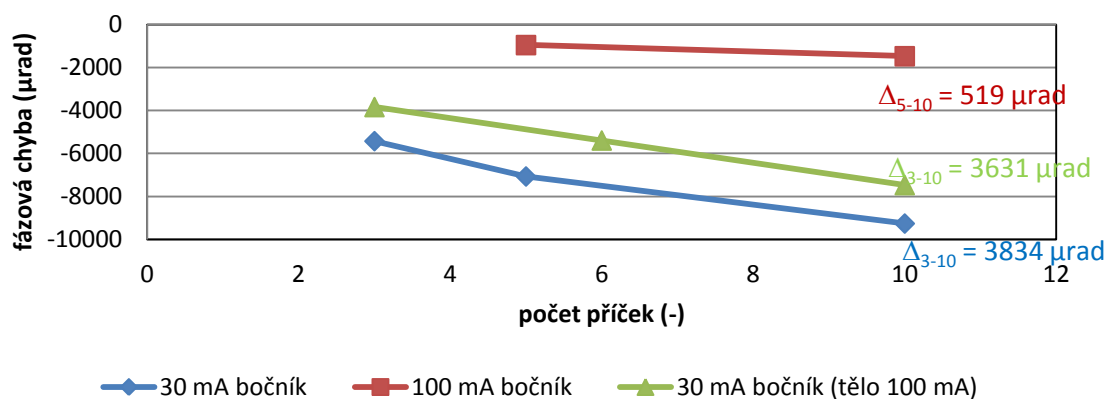
Obrázek 9.14 Závislost fázové chyby na změně délky příčky,  $f = 100 \text{ kHz}$

#### 9.1.2.7 Parametrická simulace vlivu rozměrů a počtu příček

Dále byl simulován vliv počtu příček na frekvenční charakteristiku 30mA bočníku, který jako jediný bočník má z deseti příček sedm volných a tři osazené jedním rezistorem. Počet příček byl postupně snížen až na tři tak, aby všechny byly osazené jedním rezistorem. Z grafů na obrázcích 9.15 a 9.16 je vidět, že snížení počtu příček vede ke snížení AC-DC difference o 62,1 ppm a fázové chyby o 3834  $\mu\text{rad}$ . Pokud by se navíc pro 30mA bočník použila konstrukce stejná jako pro 100mA bočník, tedy také DPS o tloušťce 2 mm místo stávajících 1,5 mm (zelená křivka), klesla by AC-DC difference v případě použití tří příček ještě o dalších 24 ppm a fázová chyba o 1587  $\mu\text{rad}$ . Pro srovnání je uvedena také závislost AC-DC difference a fázové chyby pro 100mA bočník, kde snížení počtu příček o polovinu ukazuje pokles AC-DC difference o 10 ppm a fázové chyby o 519  $\mu\text{rad}$ .



Obrázek 9.15 Závislost AC-DC difference na změně počtu příček,  $f = 100 \text{ kHz}$



Obrázek 9.16 Závislost fázové chyby na změně počtu příček,  $f = 100 \text{ kHz}$

Dále byl studován vliv změny deskových dílů, pokud by se místo nich použily kruhové a tedy jejich povrch by byl stejně velký jako povrch kruhu ve výstupní části konstrukce ( $S_d = S_c$ ). V tabulkách 9.1 a 9.2 jsou uvedeny vypočítané hodnoty AC-DC difference a fázové chyby pro stávající konstrukci a pozměněnou. Je vidět, že změna desek za kruhy znamená vylepšení AC-DC difference i fáze pro všechny bočníky, nejvýznamněji pak pro 30mA bočník.

Nakonec byl sledován vliv celkového zvětšení konstrukce, kdy by 30mA bočník byl osazen do těla pro 100mA bočník (se třemi příčkami), 100mA a 300mA bočníky by byly osazeny do těla 1A bočníku (s deseti příčkami) a konečně 10A by byl osazen do těla s deskami dvakrát většími než stávající (a se sto příčkami).

V tabulce 9.1 jsou pak uvedeny vypočítané hodnoty AC-DC difference. Je vidět, že u všech bočníků kromě 30mA a 1A došlo ke zhoršení AC-DC difference, přičemž u 1A je vliv na změnu AC-DC difference poměrně malý, pouze cca 3 ppm, naopak u 10A bočníku došlo ke zhoršení o řád. Nicméně pokud by se 10A bočník osadil do těla pro 1A bočník, znamenalo by to naopak zlepšení AC-DC difference na hodnotu menší než 2 ppm na 100 kHz.

Fázová chyba (viz tabulka 9.2) se pak zvětšila u všech bočníků kromě 30mA a 10A bočníku. Osazení 10A bočníku do těla pro 1 A bočník by však vedlo k mírnému zvětšení fázové chyby o 66 μrad.

Tabulka 9.1 Závislost AC-DC difference na změně rozměrů,  $f = 100 \text{ kHz}$

| Změna rozměrů      | AC-DC difference (ppm) na 100 kHz |              |              |           |            |
|--------------------|-----------------------------------|--------------|--------------|-----------|------------|
|                    | 30mA bočník                       | 100mA bočník | 300mA bočník | 1A bočník | 10A bočník |
| originál           | 135,6                             | 27,2         | 9,4          | 6,9       | -18,2      |
| $S_d = S_c$        | 111,8                             | 23,8         | 8,3          | 6,4       | -12,8      |
| menší tělo bočníku | -                                 | -            | -            | -         | -1,5       |
| originál           | 135,6                             | 27,2         | 9,4          | 6,9       | -18,2      |
| větší tělo bočníku | 49,5                              | 47,3         | 15,3         | 2,7       | -205,2     |

**Tabulka 9.2** Závislost fázové chyby na změně rozměrů,  $f = 100 \text{ kHz}$

| Změna rozměrů      | Fázová chyba ( $\mu\text{rad}$ ) na 100 kHz |              |              |           |            |
|--------------------|---------------------------------------------|--------------|--------------|-----------|------------|
|                    | 30mA bočník                                 | 100mA bočník | 300mA bočník | 1A bočník | 10A bočník |
| originál           | -9257                                       | -1472        | -490         | -907      | 1011       |
| Sd = Sc            | -7824                                       | -1293        | -430         | -858      | 1026       |
| menší tělo bočníku | -                                           | -            | -            | -         | 1077       |
| originál           | -9257                                       | -1472        | -490         | -907      | 1011       |
| větší tělo bočníku | -3837                                       | -3004        | -1335        | -1547     | 796        |

## 9.2 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 přičky.

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

Cílem by měla být co nejmenší frekvenční závislost impedance bočníku, aby bylo splněno: AC-DC difference menší než 10 ppm a fázová chyba menší než 100  $\mu\text{rad}$  na 5 A a 100 kHz a AC-DC difference menší než 50 ppm a fázová chyba menší než 500  $\mu\text{rad}$  na 100 A a 100 kHz, což jsou shodné parametry, které byly zvoleny za cíl v konstrukci precizních bočnicků 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.

Návrh / optimalizace konstrukce pak obecně bude spočívat především:

- ve volbě vhodné DPS,
- ve volbě jiných rezistorů,
- v úpravě rozměrů (zejména přiček).

Při samotné konstrukci nových bočnicků pak bude svou roli hrát také i pořizovací cena vybraných materiálů. Níže uvedené optimalizace konstrukce bočnicků nicméně nezohledňují náklady na výrobu, sledují pouze hledisko minimální frekvenční závislosti impedance bočnicků.

### 9.2.1 Výběr DPS

Z citlivostí analýzy vyplývá, že na frekvenční charakteristiku bočníku mají velký vliv dielektrické vlastnosti DPS (permitivita a ztrátový činitel) a také její tloušťka (resp. tloušťka dielektrika). Pro optimální frekvenční charakteristiku (tedy minimální závislost impedance na frekvenci) je třeba vybrat DPS s co nejnižší permitivitou a ztrátovým činitelem dielektrika a s co největší tloušťkou.

Sortiment DPS je velmi široký, nicméně obecně lze říci, že malý ztrátový činitel a permitivitu mají DPS určené pro vysokofrekvenční obvody. Tloušťka vyráběných DPS se obvykle pohybuje do 2,5 mm.

V následující tabulce je pak uveden přehled vybraných vysokofrekvenčních (vf) DPS s uvedenou permitivitou, ztrátovým činitelem a materiálem laminátu. (jejich katalogové listy jsou v příloze č. 3 na CD). Materiál laminátu je důležitý z hlediska ohebnosti DPS, která je pro konstrukci nežádoucí. Vybrané vf DPS mají laminát z materiálů neohebných (skelná vlákna, pryskyřice, keramika) nebo sice ohebných, ale vyztužených pomocí skelných vláken (teflon/sklo).

**Tabulka 9.3** Vybrané vf DPS (E-glass = tkaná skelná vlákna, PTFE = teflon, PPE/R = směs polymerů a pryskyřice, H/C = uhlíkový vyztužený sklem/keramika)

| Typ DPS       | Materiál laminátu | Permitivita     | Ztrátový činitel   |
|---------------|-------------------|-----------------|--------------------|
| ISOLA 620i    | E-glass           | 3,6 (@ 1 MHz)   | 0,008 (@ 1 MHz)    |
| MEGTRON 6     | PPE/resin         | 3,4 (@ 2 GHz)   | 0,002 (@ 2 GHz)    |
| TLC           | PTFE/E            | 3,2 (@ 10 GHz)  | 0,003 (@ 10 GHz)   |
| TLX           | PTFE/E            | 2,5 (@ 10 GHz)  | 0,0019 (@ 10 GHz)  |
| Rogers RO4000 | H/C               | 3,43 (@ 10 GHz) | 0,0021 (@ 2,5 GHz) |

### 9.2.2 Výběr rezistorů

Citlivostní analýza ukázala, že parazitní kapacita a zejména pak indukčnost ovlivňují významně fázovou chybu bočníku. U bočnic 30 mA až 1 A, které mají zápornou fázovou chybu, je jejich fázová chyba redukována s nižší parazitní kapacitou a zároveň s vyšší parazitní indukčností. U 10A bočnic je tomu naopak, protože jeho fázová chyba nabývá kladných hodnot.

U klecových bočnic se obvykle používají rezistory fy. Vishay, řady S102 nebo Z201 (viz kapitola 3.2.1), které mají velmi malý TCR ( $\leq 2$  ppm/K) a u nichž výrobce uvádí maximální indukčnost 80 nH. Nicméně měření vybraného vzorku těchto rezistorů ukázala, že jejich indukčnost je ve skutečnosti mnohem nižší ( $< 13$  nH, viz tabulka 8.2). Vzhledem k tomu, že pro osazení bočnic se používají spíše menší hodnoty odporu, lze předpokládat, že indukčnost 80 nH může korespondovat až s vyššími hodnotami rezistorů.

V sortimentu firmy Vishay je řada dalších typů foliových rezistorů (ať už nožičkových nebo SMD), které se vyznačují malým TCR ( $\leq 2$  ppm/K) a které výrobce označuje jako bezindukční (např. řada VHZ Hermetic, VSMP, VFCE atd.), bohužel jejich indukčnost je v katalogových listech uváděna opět univerzálně jako max. 80 nH, což ale ve skutečnosti, jak vyplynulo z praxe, může být mnohem méně (jejich katalogové listy jsou v příloze č. 3 na CD).

Dalším výrobcem precizních bezindukčních rezistorů je firma Caddock, která u nich uvádí indukčnost 10 nH, na druhou stranu nejmenší TCR dosažený u řady TK a řady USF300 je 5 ppm / K. Bohužel velikosti odporu v řadě TK jsou až od 1 k $\Omega$ , což použití pro klecové bočnice neumožní (jejich katalogové listy jsou v příloze č. 3 na CD). Řada USF začíná od 50  $\Omega$ , což by umožňovalo omezené použití pro bočnice na menší proudy ( $\leq 1$  A), nicméně by se musela značně rozšířit příčka, protože rozteč nožiček těchto rezistorů je od 1,5 do 3,5 cm.

Nejvhodnějším řešením při použití bezindukčních rezistorů se tedy ukazuje použít opět již osvědčené rezistory fy. Vishay, ideálně typu Z-foil, které mají TCR  $< 1$  ppm/K.

### 9.2.3 Úprava rozměrů

Na základě citlivostní analýzy lze konstatovat, že je vhodné konstrukci bočníku (tělo) navrhovat co nejmenší, ale s ohledem na dobré odvětrávání (chlazení) u bočníku pro větší hodnoty proudu ( $\geq 10$  A).

U bočníků na menší hodnoty proudu ( $\leq 1$  A) pak hrají významnou roli také rozměry příček, které by měly být co nejmenší. Navíc, případné neosazené příčky výrazně zhoršují frekvenční charakteristiku, jak bylo ukázáno na případu 30mA bočníku.

Při návrhu nových příček lze také využít možnost zúžit pouze plošný spoj a šířku dielektrika ponechat pro zachování pevnosti konstrukce (technologie pro výrobu DPS) místo stávajícího vedení proudu celou Cu vrstvou. Stávající příčky jsou také univerzálně navrženy pro osazení čtyř rezistorů, pokud je osazováno rezistorů méně, lze příčku o nevyužitou část zkrátit (samozřejmě při zachování dostatečné cirkulace vzduchu pro chlazení rezistorů).

### 9.2.4 Optimalizace konstrukce stávajících bočníků

Níže jsou uvedeny možnosti úprav konstrukce pro existující sadu bočníků o hodnotách 30 mA/50  $\Omega$ , 100 mA/10  $\Omega$ , 300 mA/3,3  $\Omega$ , 1 A/1  $\Omega$ , 10 A/0,1  $\Omega$  tak, aby frekvenční závislost jejich impedance byla co nejmenší.

Simulace AC-DC difference byly prováděny pro zátěž s TC (90  $\Omega$ ) a simulace fázové chyby pro zátěž AGT (50 k $\Omega$ ) tak, aby výsledky byly porovnatelné s výpočtem modelu z kapitoly 8.1.2.3.

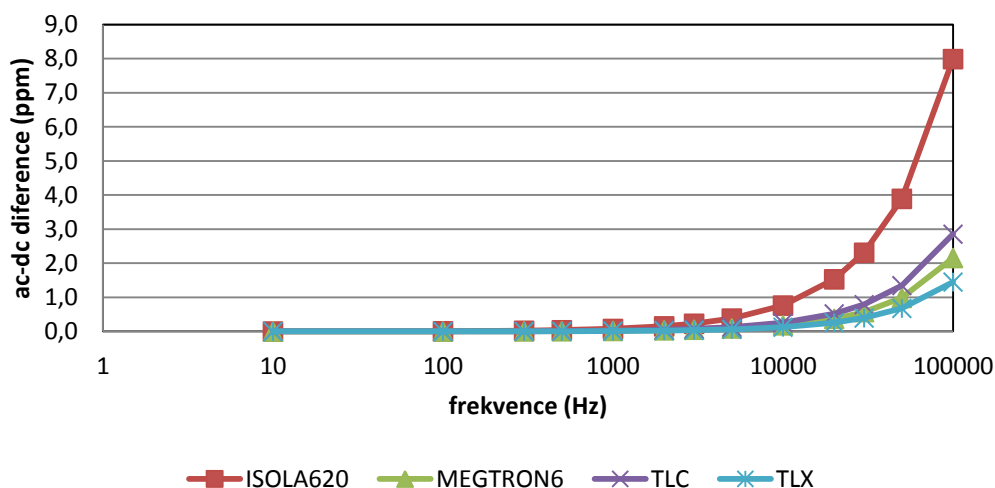
#### 9.2.4.1 Optimalizace konstrukce 30mA bočníku

Stávající 30mA bočník má ze všech bočníků největší závislost AC-DC difference a fázové chyby na frekvenci ( na 100 kHz je to 135 ppm a -6257  $\mu$ rad).

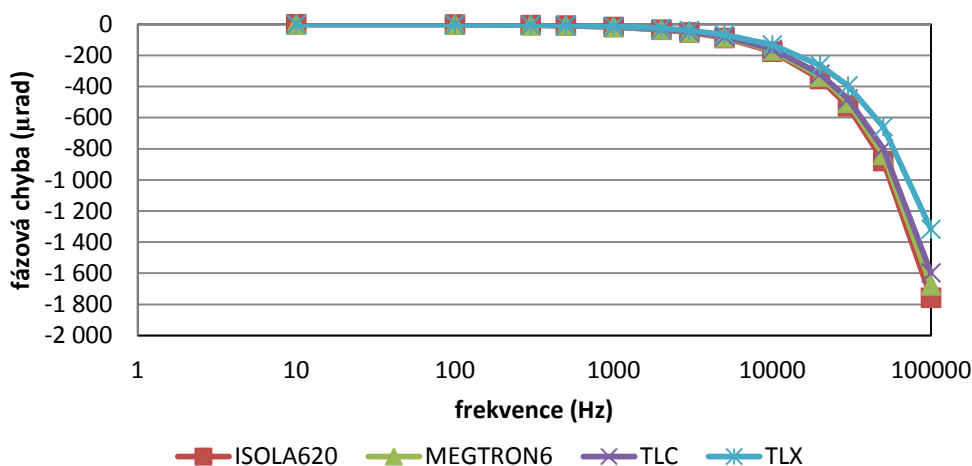
Jak vyplynulo z citlivostní analýzy, kromě špatné volby typu a tloušťky DPS (FR4) jsou dalšími příčinami velké frekvenční závislosti volné (neosazené) příčky, větší rozměry desek, kruhu i příček než např. u 100mA bočníku.

V prvním kroku optimalizace byly tedy stávající rozměry konstrukčních částí nahrazeny rozměry shodnými pro 100mA bočník. Rozměry desek a kruhu jsou zároveň i nejmenší možné rozměry kvůli tomu, že se do jejich středu musí osadit konektor, nelze tedy již zmenšit poloměr mezikruží, ve kterém jsou osazovány příčky. Počet příček byl snížen na tři tak, aby na každé byl osazen jeden 150 $\Omega$  rezistor. Tloušťka DPS byla zvolena 2,5 mm, což je největší možná tloušťka, ve které standardně DPS vyrábí. U příček bylo uvažováno místo oboustranné DPS použití dvou jednostranných přiložených k sobě stranami bez Cu vrstvy, což vodivé strany oddálí na 5 mm a sníží se tak kapacita příček. Na druhou stranu je potřeba zvýšit indukčnost a kapacitu rezistorů vzhledem k prodloužení nožiček.

Výsledky při volbě několika různých typů vf DPS (jejich dielektrické vlastnosti v tabulce 9.3) jsou uvedeny v grafech na obrázcích 9.17 a 9.18. Je vidět velmi výrazné vylepšení jak AC-DC difference (lepší než 8 ppm), tak i fázové chyby (maximálně cca -1800  $\mu$ rad).

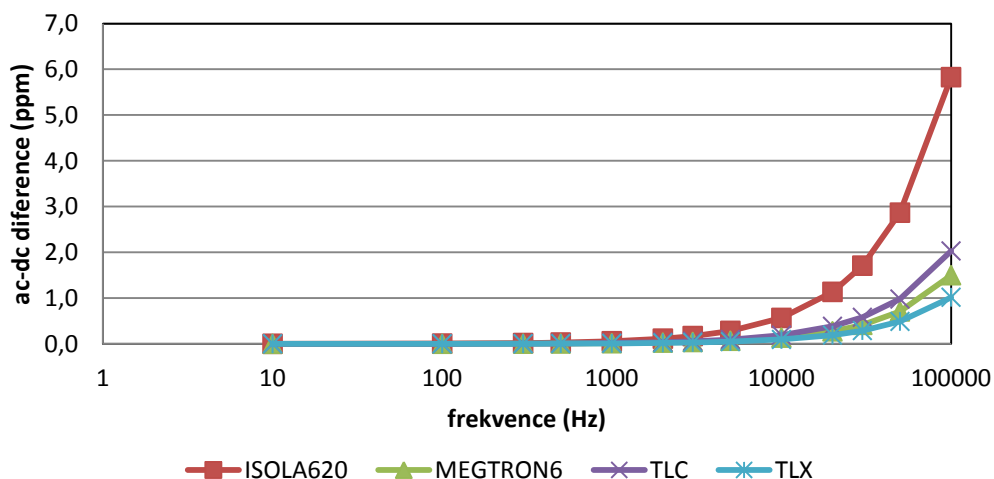


Obrázek 9.17 Frekvenční závislost AC-DC difference při prvním kroku optimalizace 30mA bočnicku

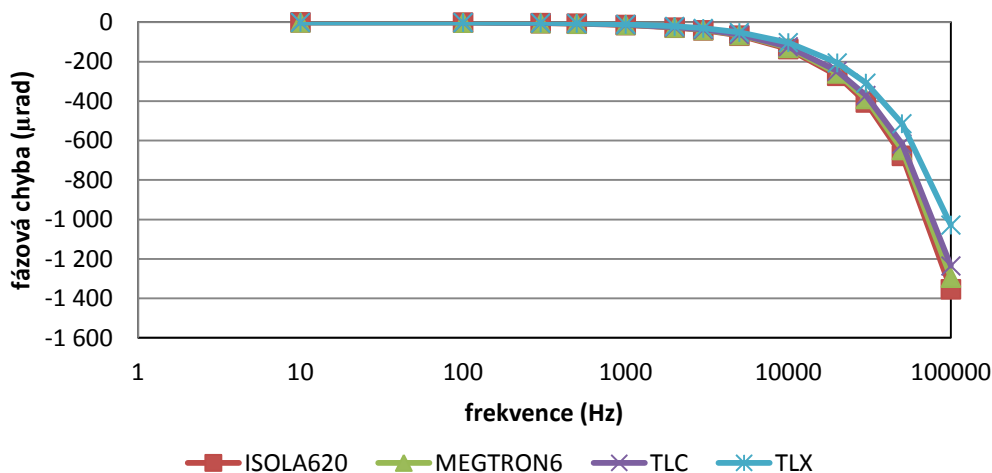


Obrázek 9.18 Frekvenční závislost fázové chyby při prvním kroku optimalizace 30mA bočnicku

Dále bylo provedeno zúžení šířky plošného spoje na příčce na 2 mm a zkrácení příčky o nevyužitou část na 35 mm. Dosažené výsledky jsou uvedeny v grafech obrázků 9.19 a 9.20. AC-DC difference klesla pod 6 ppm a fázová chyba pod -1400  $\mu$ rad. Při použití DPS typu TLX byla AC-DC difference max. 1 ppm a fázová chyba max. -1028  $\mu$ rad.

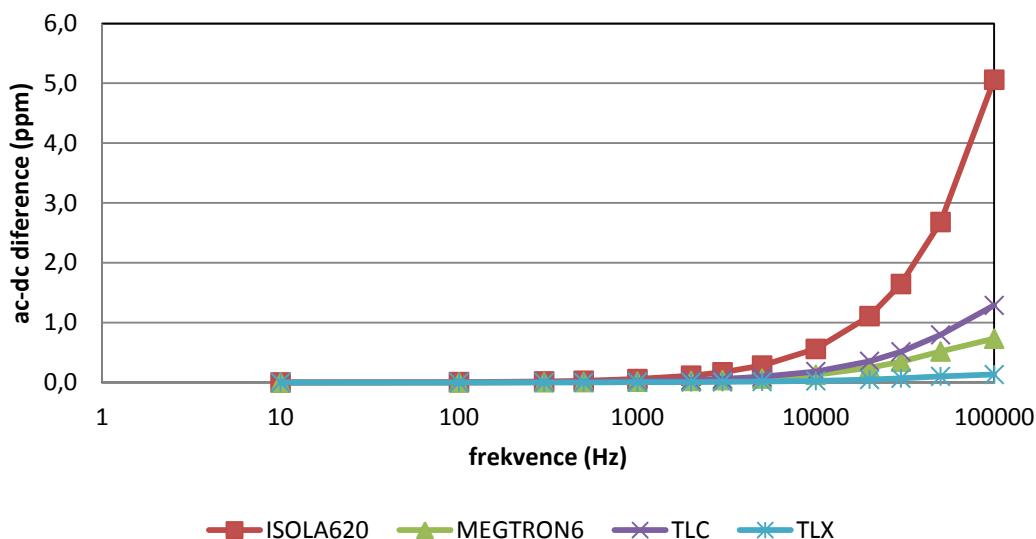


Obrázek 9.19 Frekvenční závislost AC-DC difference při druhém kroku optimalizace 30mA bočnicku

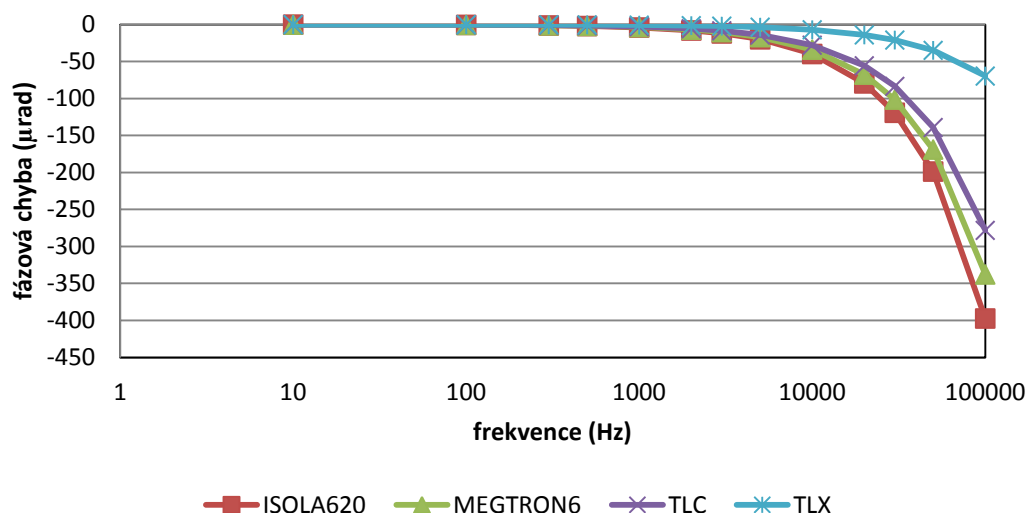


**Obrázek 9.20** Frekvenční závislost fázové chyby při druhém kroku optimalizace 30mA bočníku

Vzhledem k tomu, že fázová chyba stále nesplňovala vytyčený cíl, bylo přistoupeno ke kompenzaci frekvenční charakteristiky 30mA bočníku pomocí sériové indukčnosti připojené k použitým rezistorům. Simulace ukázaly (viz grafy na obrázcích 9.21 a 9.22), že bočník při sériové indukčnosti cca 230 nH a při použití DPS typu TLX by fázová chyba klesla na -70 μrad, přičemž AC-DC difference by nepřekročila 1 ppm.



**Obrázek 9.21** Frekvenční závislost AC-DC difference pro optimalizovaný 30mA bočník

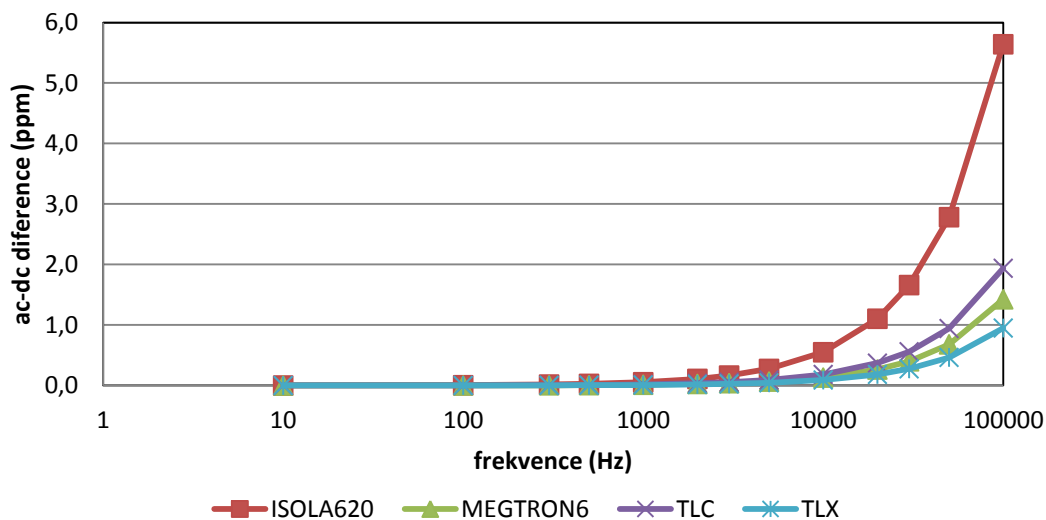


Obrázek 9.22 Frekvenční závislost fázové chyby pro optimalizovaný 30mA bočník

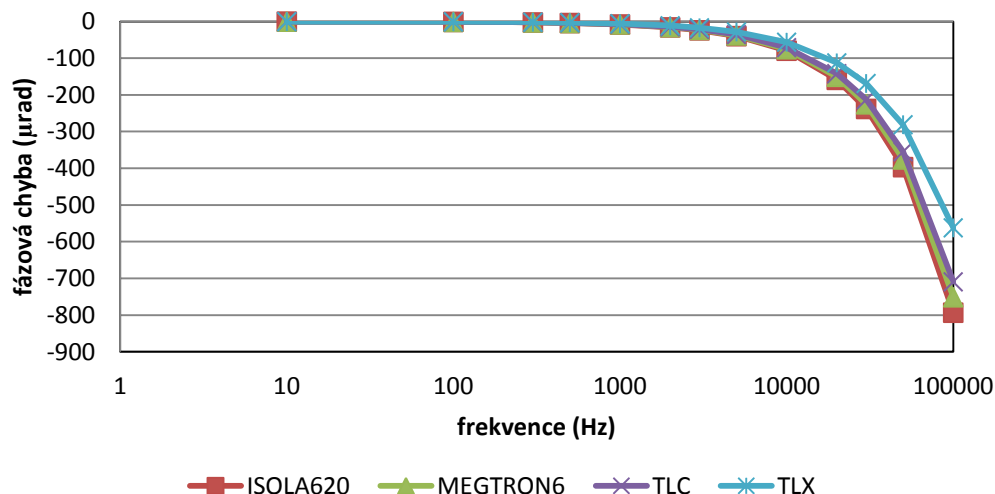
#### 9.2.4.2 Optimalizace konstrukce 100mA bočníku

Stávající 100mA bočník má maximální AC-DC diferenci a fázovou chybu (na frekvenci na 100 kHz) 28 ppm a -1472 μrad.

V rámci citlivostní analýzy se ukázalo, že frekvenční charakteristika 100mA bočníku je ovlivněna nejvíce dielektrickými vlastnostmi a tloušťkou DPS. Proto byla nejprve zvolena pouze jiná vf DPS s tloušťkou 2,5 mm. Výsledky pro vybrané vf DPS jsou uvedeny na obrázcích 9.23 a 9.24. AC-DC diference klesla pod 6 ppm, fázová chyba na max. cca -800 μrad.

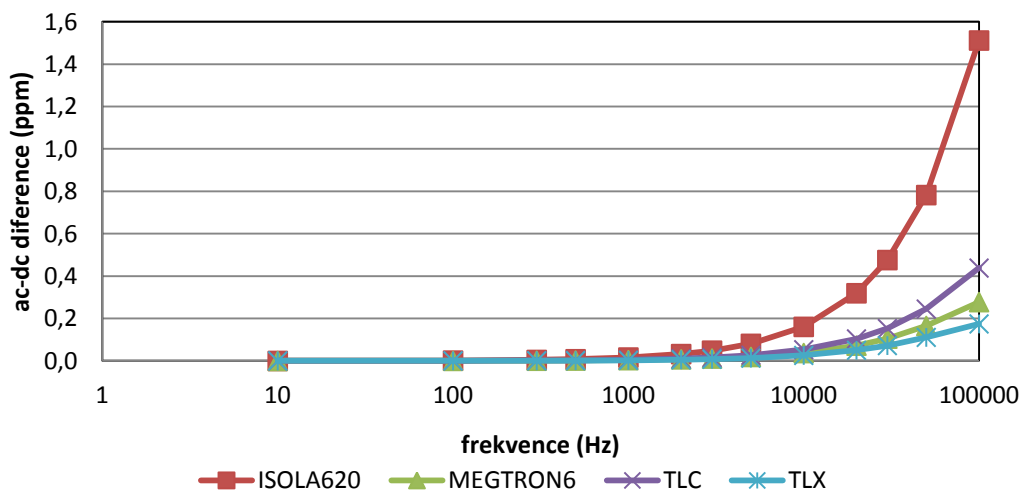


Obrázek 9.23 Frekvenční závislost AC-DC difference při optimalizaci 100mA bočníku

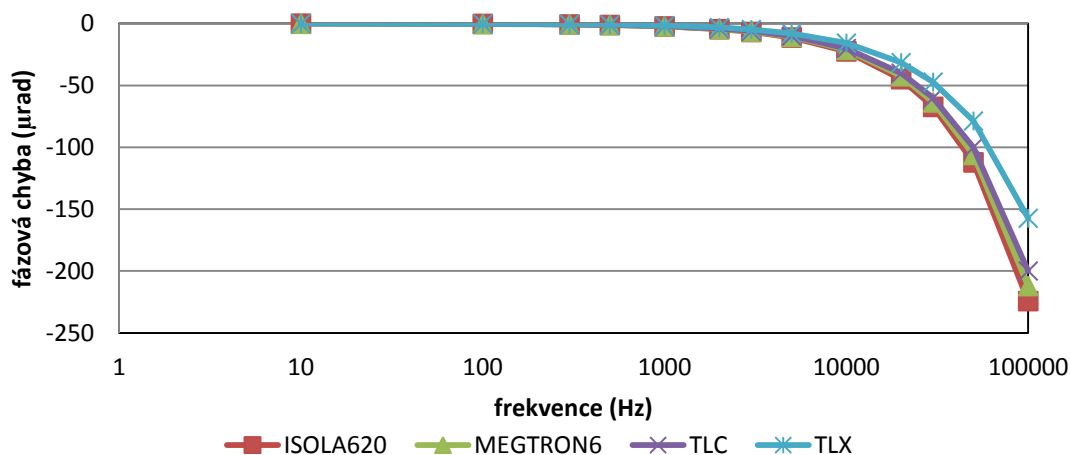


Obrázek 9.24 Frekvenční závislost fázové chyby při optimalizaci 100mA bočníku

V dalším kroku bylo provedeno snížení počtu příček na pět s tím, že na každé příčce budou osazeny dva rezistory a také zúžení šířky plošného spoje na příčce na 2 mm a zkrácení příčky o nevyužitou část na 40 mm. U příček bylo také uvažováno místo oboustranné DPS použití dvou jednostranných přiložených k sobě stranami bez Cu vrstvy, pro snížení kapacity příček. Indukčnost a kapacitu rezistorů vzhledem k prodloužení nožiček byla adekvátně zvýšena. Dosažené výsledky jsou uvedeny v grafech na obrázcích 9.25 a 9.26. Při použití DPS typu TLX se podařilo snížit AC-DC diferenci pod 0,2 ppm a fázovou chybu na max. - 157 μrad na 100 kHz.

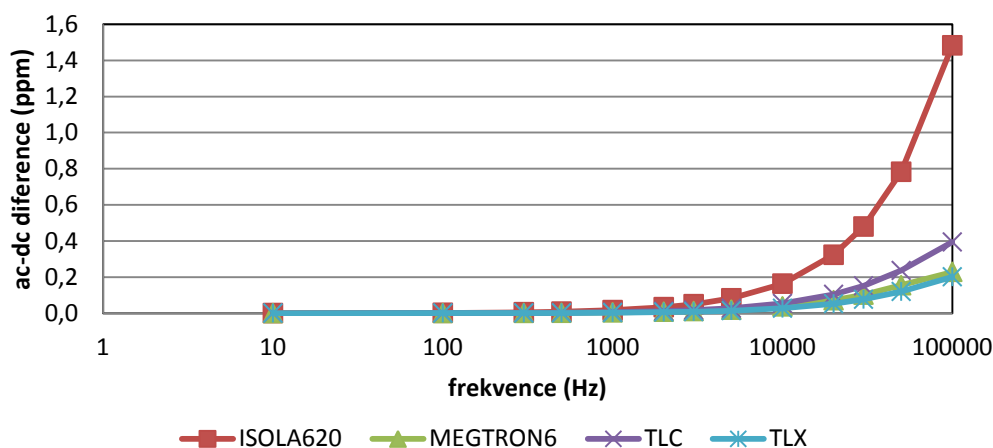


Obrázek 9.25 Frekvenční závislost AC-DC difference při druhém kroku optimalizace 100mA bočníku

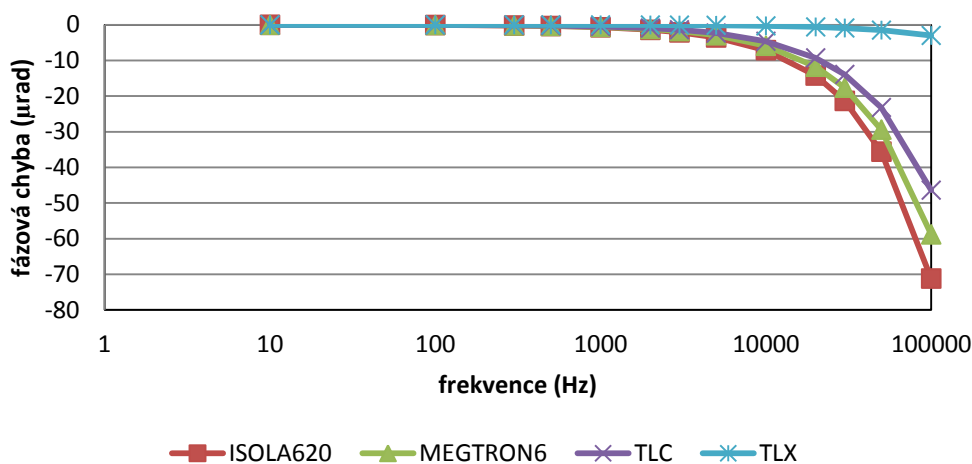


Obrázek 9.26 Frekvenční závislost fázové chyby při druhém kroku optimalizace 100mA bočníku

Vzhledem k tomu, že fázová chyba stále nesplňovala vytyčený cíl, bylo (podobně jako u 30mA bočníku) přistoupeno ke kompenzaci frekvenční charakteristiky pomocí sériové indukčnosti připojené k použitým rezistorům. Při použití indukčnosti o velikosti cca 25 nH klesla fázová chyba pod 100 μrad při použití jakékoliv ze simulovaných vf DPS, přičemž AC-DC difference nepřekročí 2 ppm (viz následující obrázky).



Obrázek 9.27 Frekvenční závislost AC-DC difference pro optimalizovaný 100mA bočník



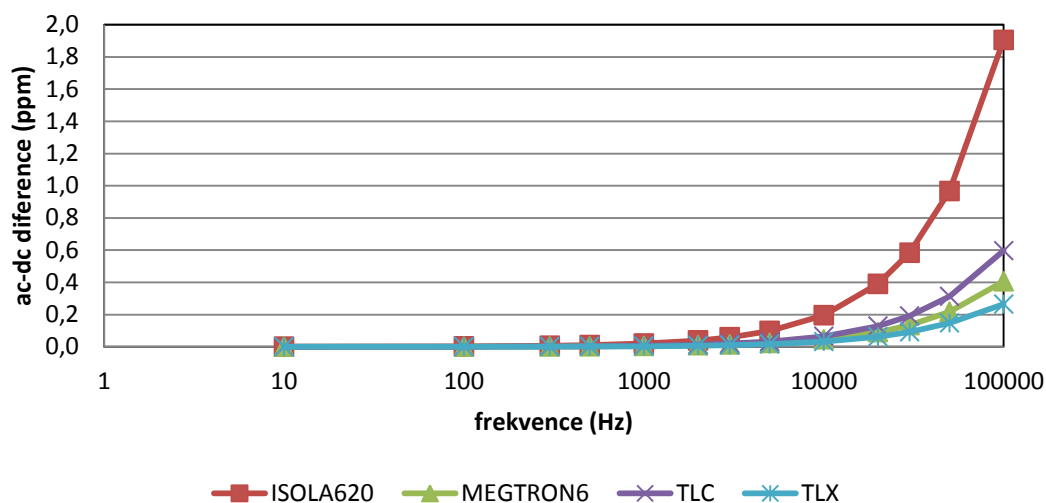
Obrázek 9.28 Frekvenční závislost fázové chyby pro optimalizovaný 100mA bočník

### 9.2.4.3 Optimalizace konstrukce 300mA bočníku

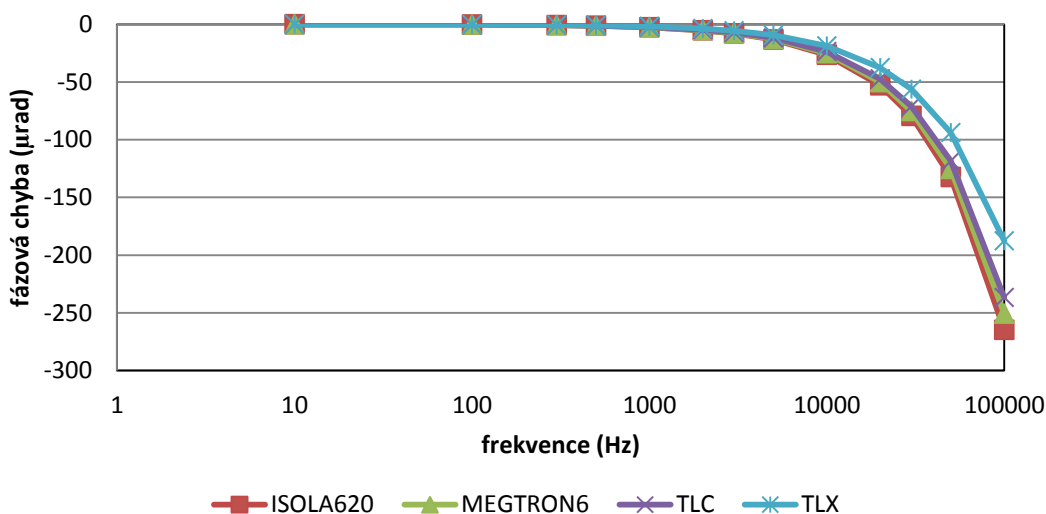
300mA bočník má maximální AC-DC diferenci a fázovou chybu (na frekvenci na 100 kHz) 10 ppm a -490  $\mu$ rad.

V rámci citlivostní analýzy se ukázalo, že podobně jako u 100mA bočníku frekvenční charakteristiku nejvíce ovlivňují dielektrické vlastnosti a tloušťka DPS. Proto byla nejprve zvolena pouze jiná (vf) DPS s tloušťkou 2,5 mm. Výsledky pro vybrané vf DPS jsou uvedeny na obrázcích 9.29 a 9.30. AC-DC difference klesla pod 2 ppm, fázová chyba na max. cca -270  $\mu$ rad.

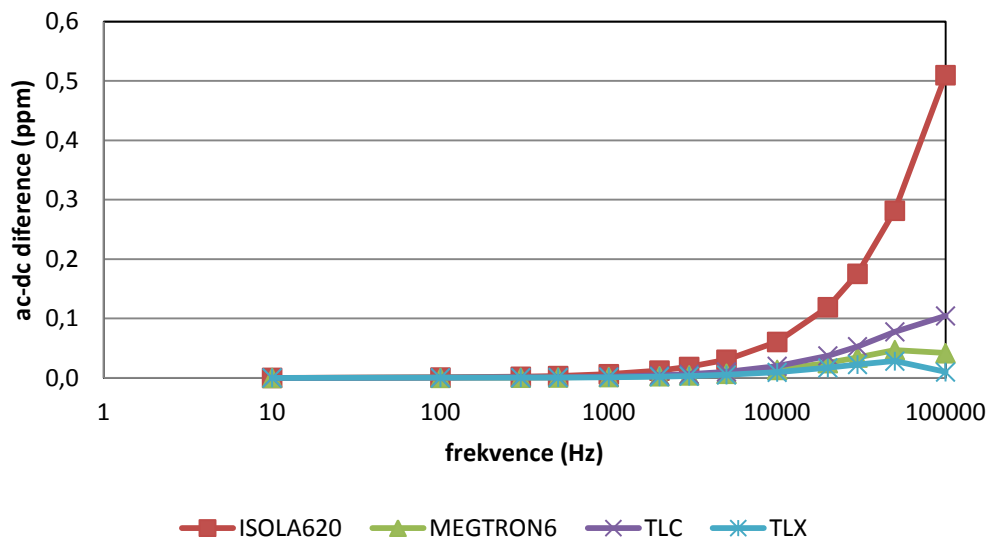
V dalším kroku byl zúžen plošný spoj na příčkách na 2 mm a příčky byly zkráceny o nevyužitou část na 45 mm. U příček bylo podobně jako u předchozích bočníků uvažováno místo jedné oboustranné DPS použití dvou jednostranných přiložených k sobě stranami bez Cu vrstvy, pro snížení kapacity příček. Indukčnost a kapacita rezistorů vzhledem k prodloužení nožiček byla adekvátně zvýšena. Dosažené výsledky jsou uvedeny v grafech na obrázcích 9.31 a 9.32. Při použití DPS typu TLX se podařilo snížit AC-DC diferenci pod 0,1 ppm, fázová chyba na 100 kHz je pak -26  $\mu$ rad.



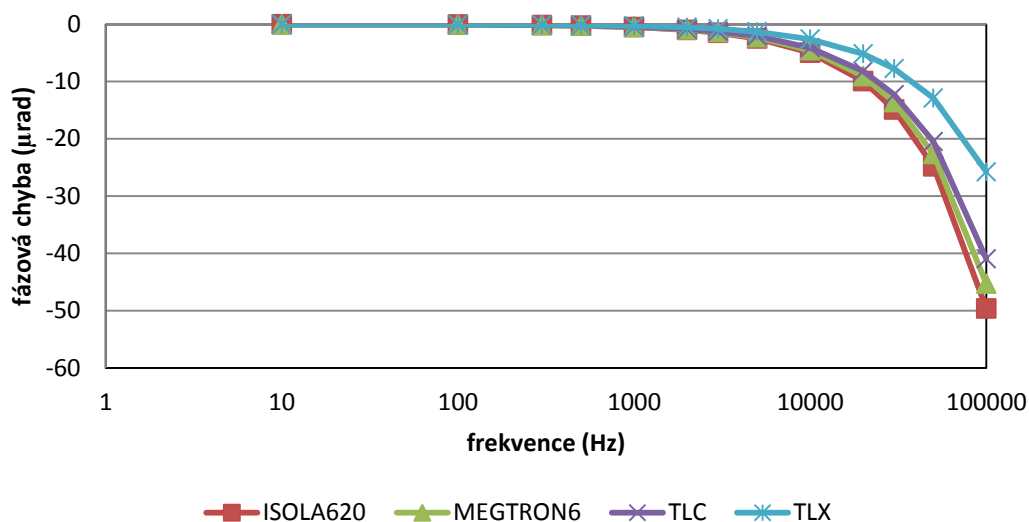
Obrázek 9.29 Frekvenční závislost AC-DC difference při optimalizaci 300mA bočníku



Obrázek 9.30 Frekvenční závislost fázové chyby při optimalizaci 300mA bočníku



Obrázek 9.31 Frekvenční závislost AC-DC difference pro optimalizovaný 300mA bočník



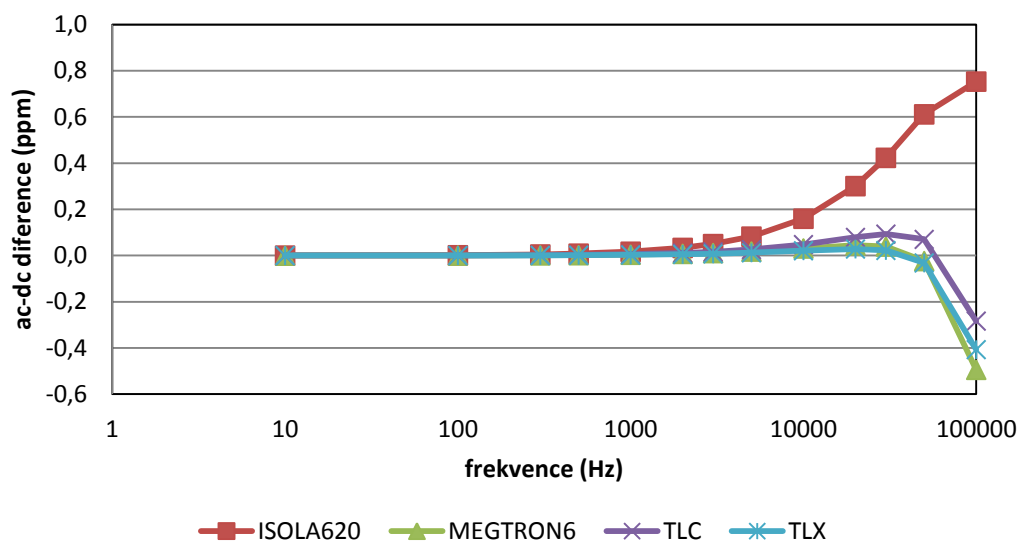
Obrázek 9.32 Frekvenční závislost fázové chyby pro optimalizovaný 300mA bočník

#### 9.2.4.4 Optimalizace konstrukce 1A bočníku

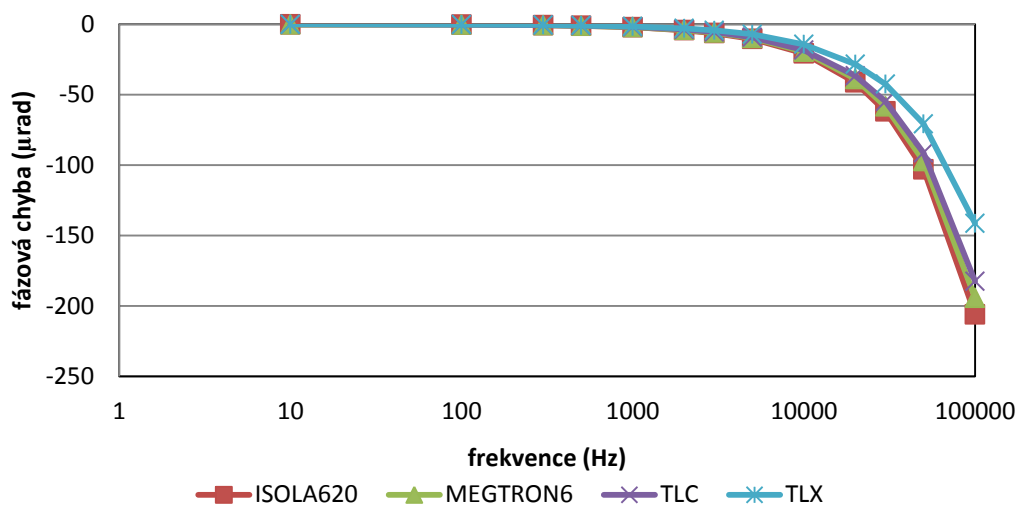
Stávající 1A bočník má ze všech bočníků nejlepší frekvenční vlastnosti: maximální AC-DC difference a fázová chyba (na frekvenci na 100 kHz) jsou 7 ppm a -404 μrad.

V rámci citlivostní analýzy se ukázalo, že tyto hodnoty lze ještě snížit volbou jiné (vf) DPS s větší tloušťkou (2,5 mm). Výsledky jsou uvedeny na obrázcích 9.33 a 9.34. AC-DC difference klesla pod ±1 ppm, fázová chyba pak na max. cca -206 μrad.

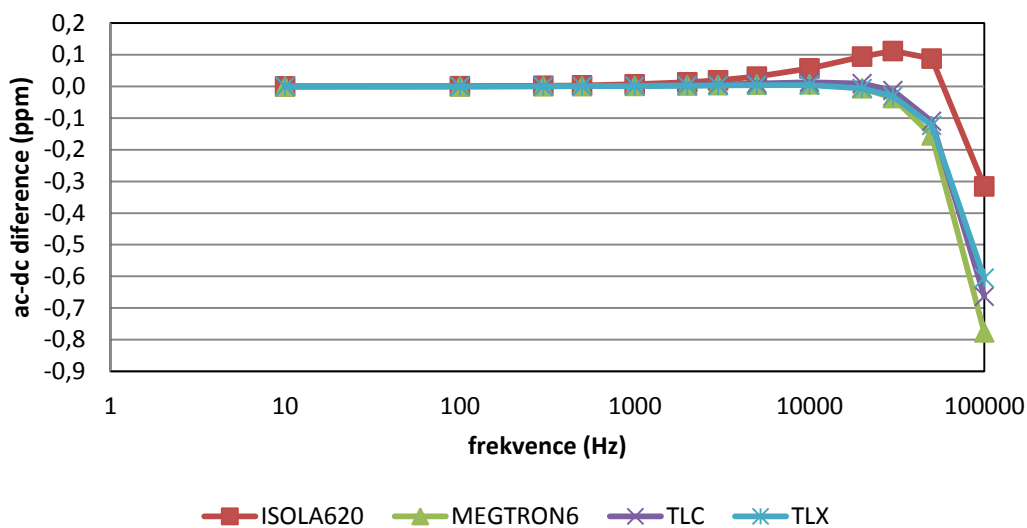
Dále byla podobně jako u předchozích bočníků zúžena šířka plošného spoje na příčce na 2 mm, příčky byly zkráceny na minimum (na 50 mm) a místo jedné oboustranné DPS byly uvažovány dvě jednostranné s adekvátním navýšením indukčnosti a kapacity rezistorů. To vedlo k vylepšení fázové chyby až na -32 μrad na 100 kHz při použití DPS typu TLX, přičemž AC-DC difference zůstala pod 1 ppm (viz grafy na obrázcích 9.35 a 9.36).



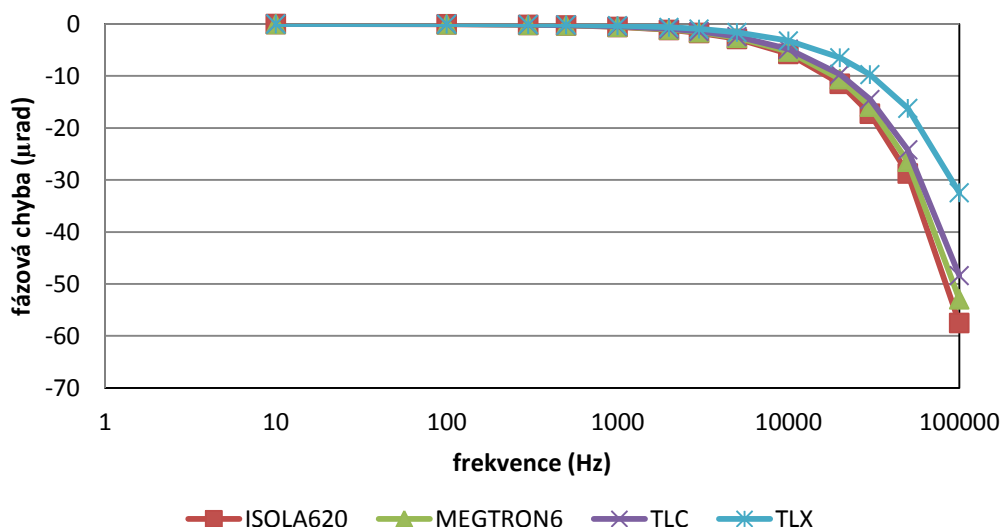
Obrázek 9.33 Frekvenční závislost AC-DC difference při optimalizaci 1A bočnicku



Obrázek 9.34 Frekvenční závislost fázové chyby při optimalizaci 1A bočnicku



Obrázek 9.35 Frekvenční závislost AC-DC difference pro optimalizovaný 1A bočník

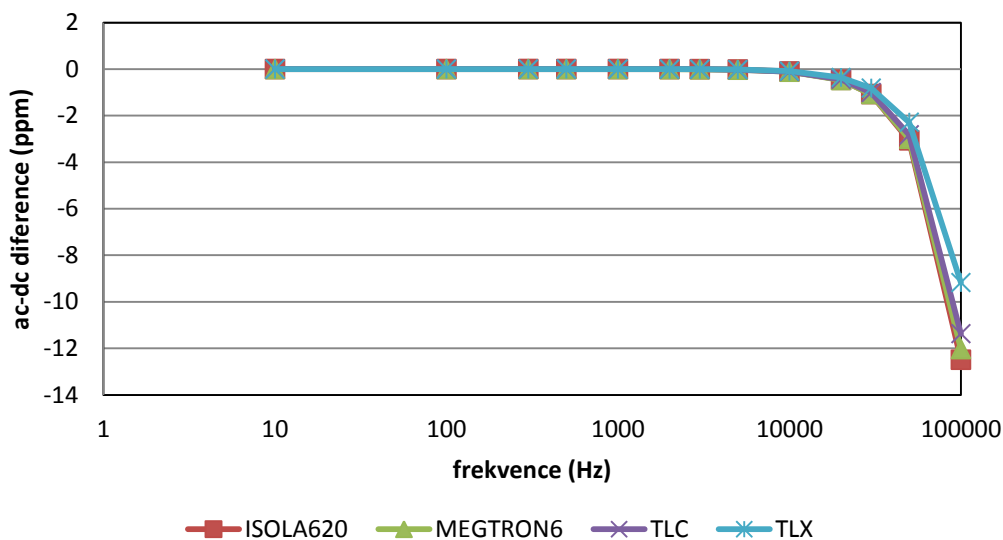


Obrázek 9.36 Frekvenční závislost fázové chyby pro optimalizovaný 1A bočník

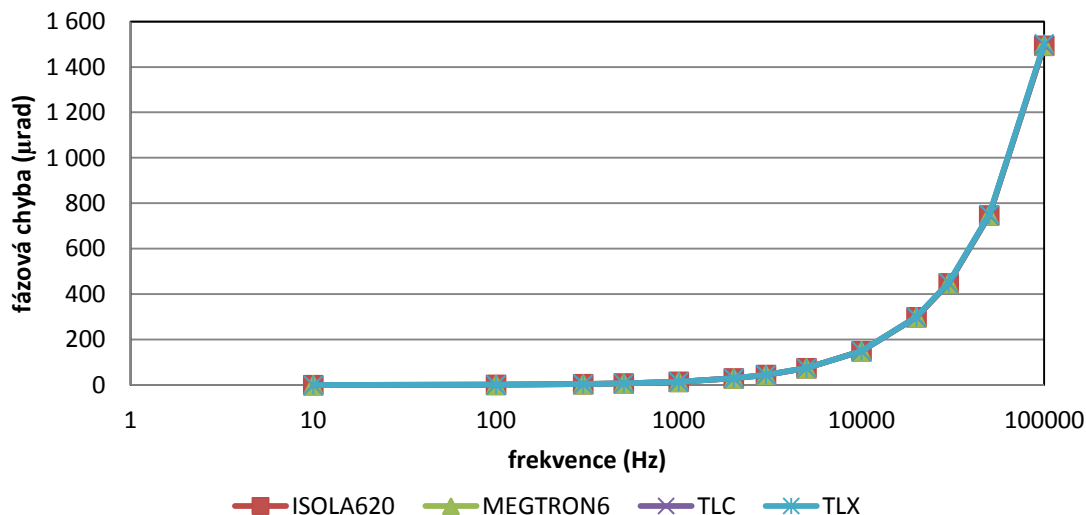
#### 9.2.4.5 Optimalizace konstrukce 10A bočníku

10A bočník má na 100 kHz AC-DC diferenci -18 ppm a fázovou chybu 1011 μrad.

Pokud budeme uvažovat stejné konstrukční změny jako u ostatních bočníků, tedy volbu vf DPS s tloušťkou 2,5 mm, u příček jejich zkrácení na minimum (40 mm), použití dvou jednostranných DPS se zúžením plošného spoje na 2 mm, pak dojde sice k mírnému vylepšení AC-DC difference (viz obrázek 9.37), ale vlivem zvýšení indukčnosti rezistorů o prodloužené nožičky ke zhoršení fázové chyby (viz obrázek 9.38).



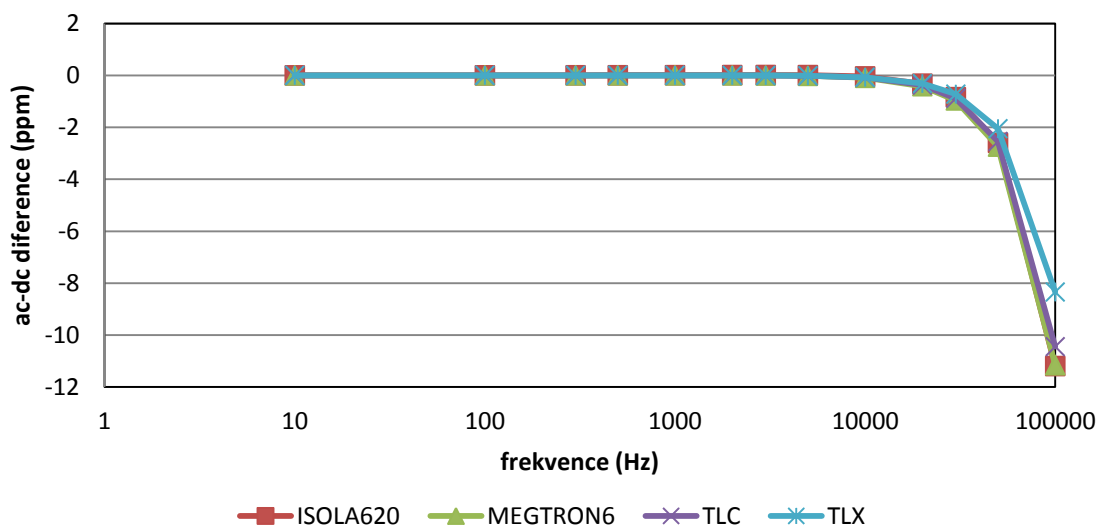
Obrázek 9.37 Frekvenční závislost AC-DC difference při optimalizaci 10A bočníku



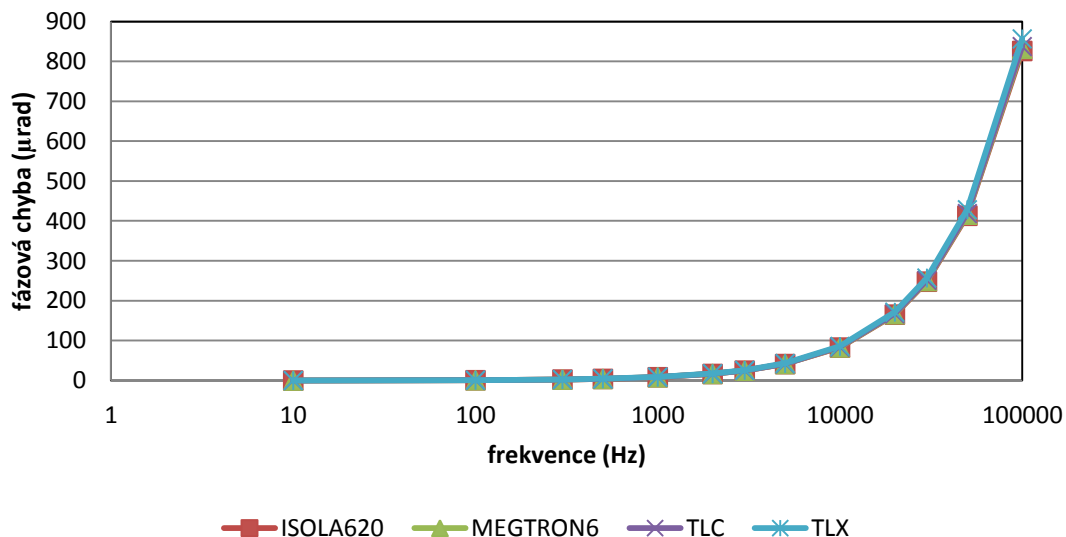
**Obrázek 9.38** Frekvenční závislost fázové chyby při optimalizaci 10A bočníku

Proto byla dále uvažována naopak co nejtenčí dvoustranná DPS u příček se zachováním konstrukční pevnosti a to vř DPS tloušťky 1 mm. AC-DC difference klesla pod -12 ppm a fázová chyba pod 860  $\mu$ rad (viz obrázky 9.39 a 9.40).

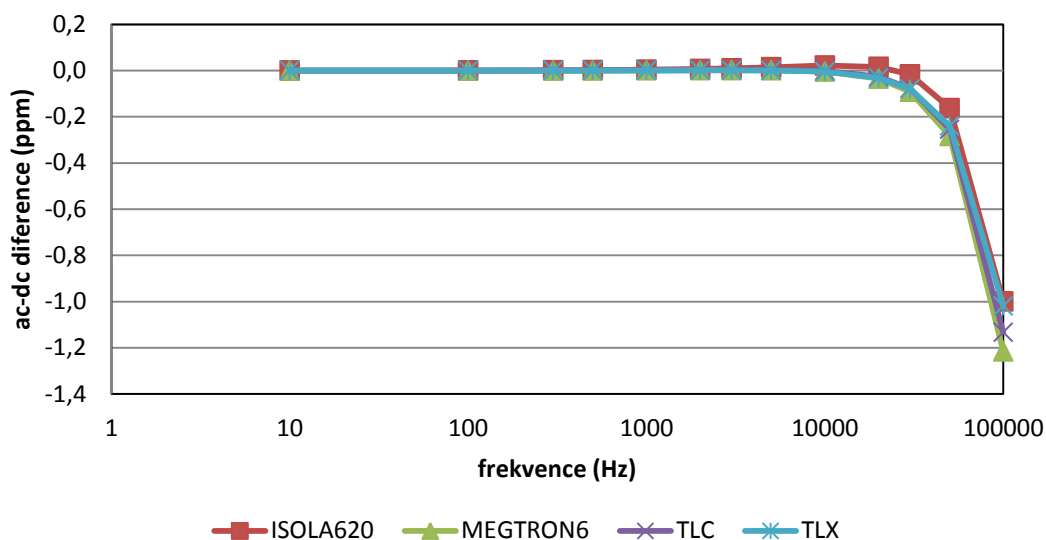
Další možností je upravit rozměry desek a kruhu a použít stejné jako u 1A bočníku, který je osazen shodným počtem rezistorů (100 ks). Výsledky jsou uvedeny v grafech na obrázcích 9.41 a 9.42. AC-DC difference opět klesla a to pod -1,5 ppm, nicméně fázová chyba se zhoršila na téměř 900  $\mu$ rad.



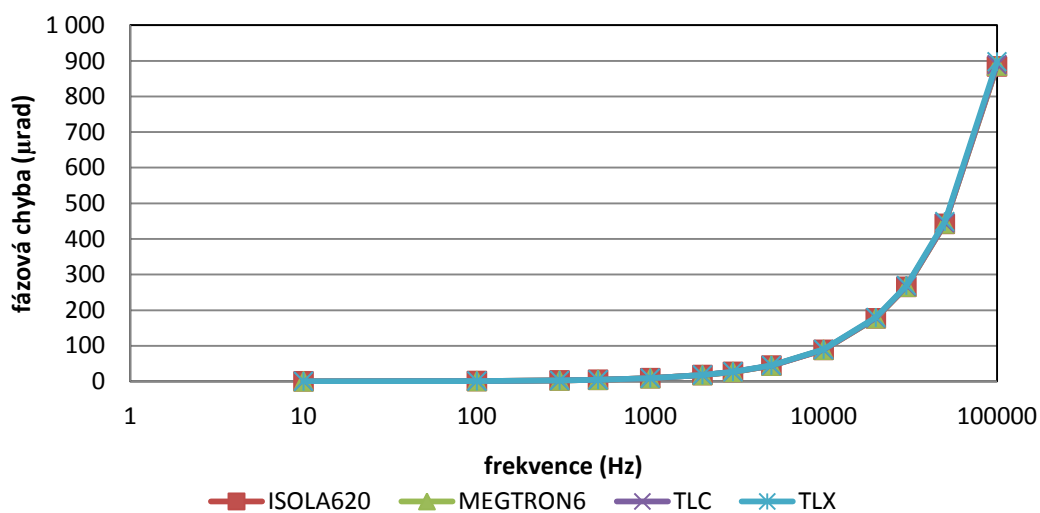
**Obrázek 9.39** Frekvenční závislost AC-DC difference optimalizace tloušťky příček 10A bočníku



Obrázek 9.40 Frekvenční závislost fázové chyby optimalizace tloušťky příček 10A bočnicku



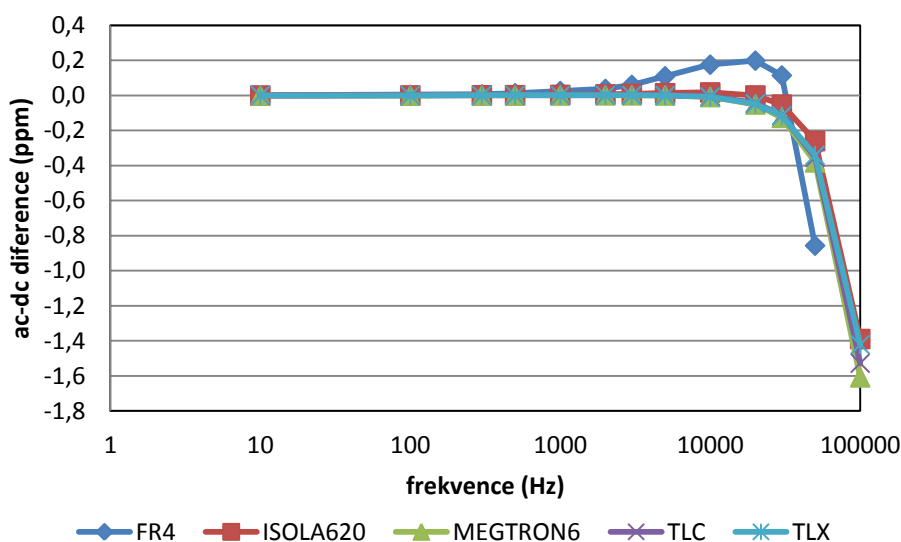
Obrázek 9.41 Frekvenční závislost AC-DC difference pro 10A bočník s rozměry 1A bočnicku



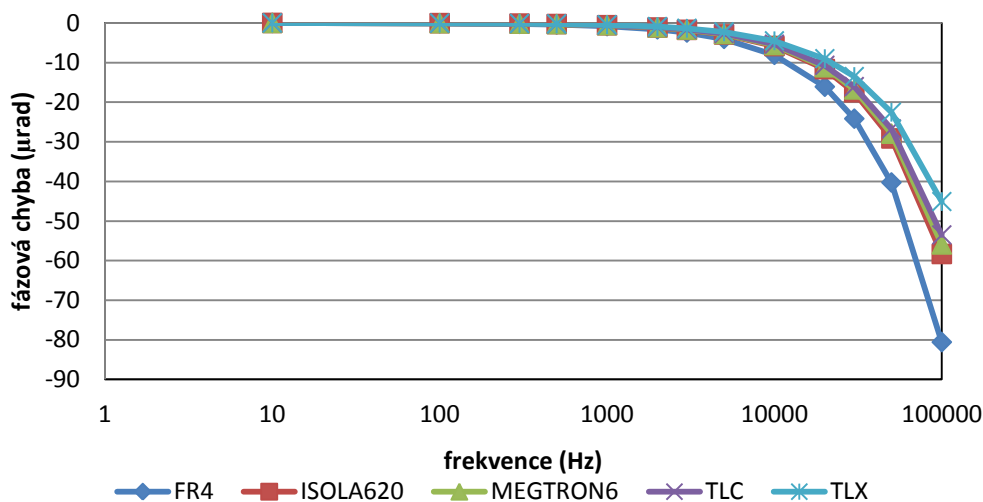
Obrázek 9.42 Frekvenční závislost fázové chyby pro 10A bočník s rozměry 1A bočnicku

Vzhledem k tomu, že samotné konstrukční změny nestačily k tomu, aby fázová chyba klesla pod požadovaných 200  $\mu\text{rad}$ , byly provedeny další simulace vycházející ze závislosti fázové chyby 10A bočnicku na velikosti parazitní kapacity rezistorů. Protože z výsledků citlivostní analýzy vyplynulo, že s rostoucí parazitní kapacitou fázová chyba klesá, byl paralelně ke každému rezistoru přidán kapacitor s kapacitou 150 pF pro kompenzaci frekvenční závislosti.

Výsledky jsou uvedeny na následujících obrázcích. Požadovanou minimalizaci fázové chyby splnily všechny testované DPS včetně stávající s dielektrikem FR4.



Obrázek 9.43 Frekvenční závislost AC-DC difference pro optimalizovaný 10A bočník



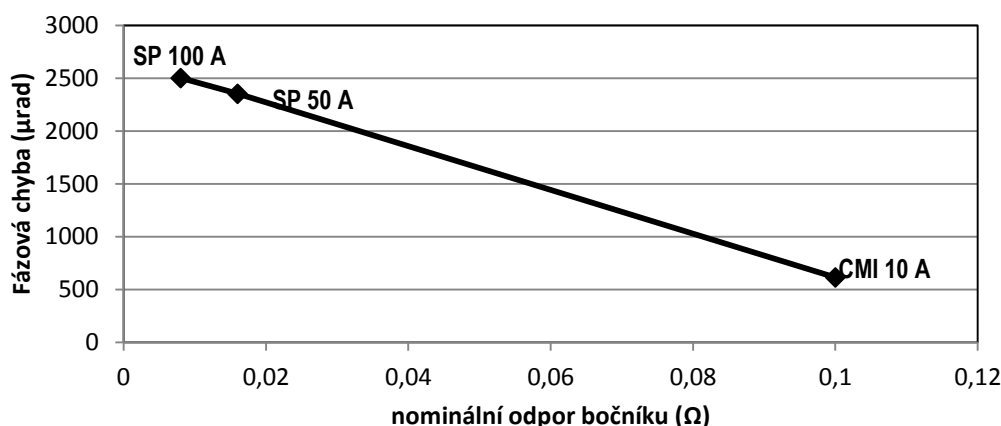
Obrázek 9.44 Frekvenční závislost fázové chyby pro optimalizovaný 10A bočník

### 9.2.5 Zásady konstrukce bočníků nad 10 A

Co se týká AC-DC difference, citlivostní analýza ukázala, že je ovlivněna především dielektrickými vlastnostmi DPS a konstrukčními rozměry. Přičemž vliv konstrukčních rozměrů klesá s klesající nominální hodnotou odporu bočnicku (nejmenší je tedy pro 10 A bočník). Lze tedy předpokládat, že pro bočníky nad 10 A bude převládat vliv dielektrických vlastností DPS na velikost AC-DC difference.

U fázové chyby citlivostní analýza odhalila, že s klesající nominální hodnotou odporu bočníků výrazně roste vliv parazitní indukčnosti rezistorů na fázovou chybu, a jak bylo ukázáno v předchozí kapitole, u 10A bočníku již převládá nad vlivem konstrukčních rozměrů a dielektrickými vlastnostmi DPS. To je způsobeno tím, že zatímco hodnota odporů osazovaných rezistorů výrazně klesá ( $100\ \Omega$  u 1A bočníku vs.  $10\ \Omega$  u 10A bočníku), jejich parazitní indukčnost se snižuje podstatně méně ( $12\ \text{nH}$  u 1A bočníku vs.  $9,5\ \text{nH}$  u 10A bočníku) a tím její vliv roste.

Lze tedy předpokládat, že u bočníků pro proudy nad 10 A fázová chyba výrazně poroste, což ukázalo i porovnání fázové chyby bočníků v rámci projektu iMERA-EMRP [67]. V grafu na obrázku 9.45 je vynesena závislost fázové chyby na nominální hodnotě odporu klecových bočníků osazených shodných typem rezistorů, které se porovnání zúčastnily. Je vidět přibližně lineární nárůst fázové chyby s klesajícím odporem bočníku [67]. Pro optimalizaci fázové chyby lze tedy předpokládat nutnost přidat kompenzační kondenzátory podobně jako u 10A bočníku.



Obrázek 9.45 Závislost fázové chyby na nominální hodnotě odporu bočníku při 50 kHz [67]

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 – tedy:

- 20A bočník:  $0,04\ \Omega$  ( $100 \times 4\ \Omega$ ),
- 50A bočník:  $0,016\ \Omega$  ( $180 \times 3\ \Omega$ ),
- 100A bočník:  $0,008\ \Omega$  ( $240 \times 2\ \Omega$ ).

Na základě výsledků optimalizace sady existujících bočníků ČMI a předpokladu analogie ovlivňování frekvenční charakteristiky obdobně jako u 10A bočníku byla zvolena vř DPS TLX (s nejlepšími dielektrickými vlastnostmi) tloušťky 2,5 mm pro desky a kruh a 1 mm pro příčky.

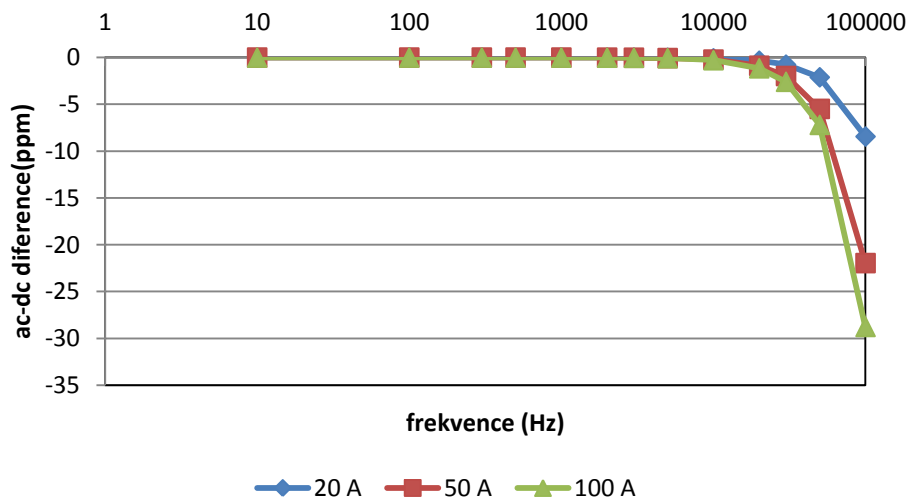
Pro simulace návrhu konstrukce 20A bočníku byl počet příček zvolen 25 (na každé příčce by měly být osazeny čtyři rezistory), u 50A bočníku pak 60 (na každé příčce budou osazeny tři rezistory) a u 100A bočníku byl počet příček stanoven na 60 se čtyřmi rezistory na každé příčce.

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 (tedy stejná jako při optimalizaci existujících bočníků).

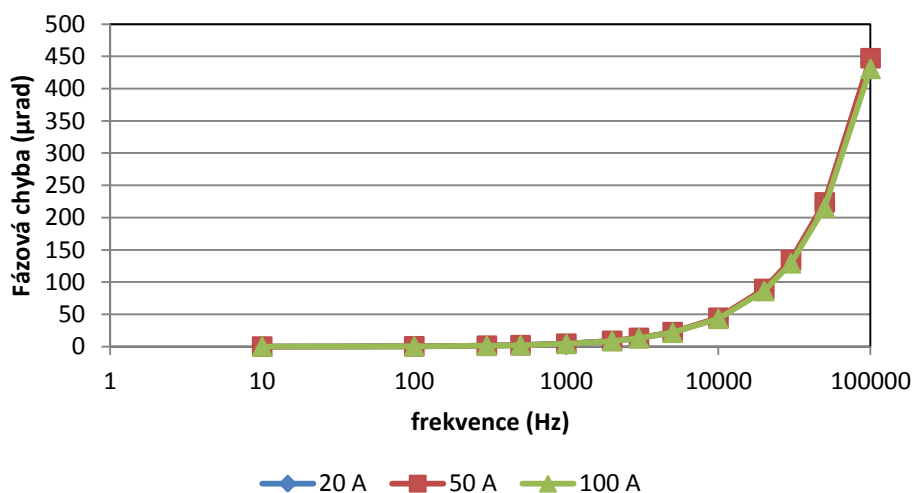
Rozměry desek a kruhu pak korespondují s počtem příček: u 20A bočníku byly zvoleny stejné rozměry jako u 1A bočníku, u 50A a 100A bočníku byla deska zvětšena na 306 x 306 mm a kruh na průměr 296 mm.

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

Výsledky simulací jsou uvedeny na následujících obrázcích. Pro kompenzaci frekvenční charakteristiky musely být použity kondenzátory paralelně připojené k rezistorům o velikosti 620 pF u 20A bočnicku, 1200 pF u 50A bočnicku a 2650 pF u 100A bočnicku.



Obrázek 9.46 Frekvenční závislost AC-DC difference pro návrh 20A, 50A a 100A bočníků



Obrázek 9.47 Frekvenční závislost fázové chyby pro návrh 20A, 50A a 100A bočníků

## 10. Shrnutí dosažených výsledků

V rámci disertační práce byly zajištěny měřicí metody pro kalibraci proudových bočníků v těchto základních parametrech: teplotní a výkonový koeficient odporu, AC-DC difference, fázová chyba.

Měření TCR a PCR probíhalo na pracovišti pro měření stejnosměrného odporu upraveném pro účely měření existujících bočníků v projektu iMERA- EMRP: Power and Energy. Z existující sady bočníků ČMI byl u všech bočníků kalibrován PCR, TCR pak jen u 10A (z důvodu nutnosti pronájmu klimakomory, která byla k dispozici pouze pro měření bočníků od 10 A účastnících se projektu Power and Energy). Dosahované nejistoty měření PCR byly od 0,44 ppm/W u 30mA bočníku až po 1,9 ppm/W u 10A bočníku. Nejistota měření TCR 10A bočníku byla 0,33 ppm/K [58], [59], [60], [61].

Pro měření AC-DC difference bočníků bylo využito pracoviště pro odvozování stupnice AC-DC difference proudů vyvinuté v Programu rozvoje metrologie. Nejistoty kalibrace bočníků se pohybovaly od 6 ppm pro 30mA bočník na 1 kHz do 36 ppm pro 10A bočník na 100 kHz [24], [62], [63], [64].

Pro měření fázové chyby byla navázána spolupráce s italským národním metrologickým institutem v rámci projektu iMERA- EMRP: Power and Energy, v rámci které byla kalibrována fázová chyba 10A bočníku. Nejistota kalibrace se pohybovala od 15 ppm (1 kHz) do 546 ppm (100 kHz) [61], [67].

V další části řešení disertační práce byl vyvinut analytický model existujících klecových bočníků ČMI, který byl založen na výpočtu impedance bočníku z kaskádní matice bočníku. Ta byla stanovena jako součin kaskádních matic dvojbranů reprezentujících jednotlivé konstrukční díly bočníků. Z vypočítané impedance pak byla stanovena AC-DC difference a fázová chyba bočníků [69]. Pro rozbor nejistot měření byla zvolena metoda Monte Carlo.

Verifikace modelu (porovnání vypočtených hodnot s kalibračními daty) ukázala shodu v rámci nejistot měření. U AC-DC difference byla maximální odchylka 6 ppm, u fázové chyby 10 A bočníku pak 110  $\mu$ rad [69].

Vyvinutý model byl poté použit k citlivostní analýze, která ukázala, že vstupními veličinami, které významně ovlivňují frekvenční charakteristiku bočníku, jsou parazitní kapacita a indukčnost použitých rezistorů, dielektrické vlastnosti a tloušťka DPS, rozměry konstrukčních dílů.

Na základě výsledků citlivostní analýzy byl proveden návrh na optimalizaci konstrukce již existujících bočníků 30 mA, 100 mA, 300 mA, 1 A a 10 A a teoretický návrh konstrukce bočníků pro 20 A, 50 A a 100 A tak, aby byly splněny shodné cíle v konstrukci precizních bočníků jako v projektu iMERA-EMRP: Power and Energy (kde se je u klecových bočníků podařilo splnit jen částečně), a to: AC-DC difference menší než 10 ppm a fázová chyba menší než 100  $\mu$ rad na 5 A a 100 kHz a AC-DC difference menší než 50 ppm a fázová chyba menší než 500  $\mu$ rad na 100 A a 100 kHz.

## 11. Závěr

Oblast přesného měření střídavých proudů je v posledních letech silně se rozvíjející problematikou zejména z hlediska měření elektrického výkonu, kde dochází ke zvětšování měřeného rozsahu i k rozšiřování požadovaných frekvenčních bodů i nad tzv. výkonové frekvence (50 Hz až 400 Hz) až do 100 kHz, což souvisí také s měřením kvality elektrické energie.

Je snaha vyvíjet měřicí převodníky proud – napětí se standardizovaným napět'ovým výstupem pro jejich univerzální začlenění do měřicích systémů jak elektrického výkonu, tak i stupnice AC-DC difference proudů.

Z poměrně široké problematiky tohoto aktuálního tématu se disertační práce 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, což 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 bočníku, kde byla shoda lepší než 111  $\mu$ 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 bočníku.

Další výzkumné práce v oblasti modelování bočníků mohou směřovat např. k vytvoření numerického modelu pomocí programů umožňujících řešení fyzikálních úloh metodou konečných prvků (Comsol Multiphysics, ANSYS) s použitím definice přenosové impedance jako poměru intenzity elektrického a magnetického pole.

Výsledky dosažené v disertační práci budou využity pro konstrukci nové sady bočníků v ČMI.

## Literatura

- [1] BOHACEK, J. Metrologie elektrických veličin. ČVUT, 1994. 238 stran. ISBN 80-01-01152-6.
- [2] BUDOVSKY, I., HAMMOND, G.M. The Measurement of Electrical Quantities. 3.vydání, CSIRO NML, 2009. 140 stran. ISBN 0-9750744-5-8.
- [3] BOHACEK, J a kolektiv autorů. Metrologie elektrických veličin, Úkol PRM 2008 č. M/VII/4/08. ČKS, 2008. CD-ROM
- [4] HORSKY, J., VOLNY, K. Kalibrátory multimetrů. *Metrologie*. 2002, roč. 12, č. 2, p.26-31. ISSN 1210-3543.
- [5] Fluke: Calibration: *Philosophy in Practice, Second Edition*. 2. vydání. 1994.
- [6] Datron Wavetek: *User's Handbook for the Datron 4920 Alternating Voltage Measurement Standard*. 1. vydání. April 1991.
- [7] Fluke: 5790A AC Measurement Standard, *Operator's Manual*. January 1992. Rev. 4, 8/12. USA.
- [8] KINARD, J. R., HASTINGS, J. R., LIPE, T.E., CHILDERS, C.B. NIST Measurement Services: AC-DC Difference Calibrations. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1989. 308 stran. Library of Congress No. 89-600736.
- [9] NOVAKOVA ZACHOVALOVA, V. AC-DC Diference napětí a proudů. *Metrologie*. 2010, roč. 19, č. 1, p.2-5. ISSN 1210-3543.
- [10] Fluke: 792A AC/DC Transfer Standard, *Instruction Manual*. July 1990. Rev. 12/92. USA.
- [11] INGLIS, B. D. Standards for AC-DC Transfer. *Metrologia*. 1992, vol. 29, no. 2, p. 191-199. ISSN 0026-1394.
- [12] KLONZ, M., WIEMANN, T. Accurate Thin-Film Multijunction Thermal Converter on a Silicon Chip. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 1989, IM-38, p. 335-337. ISSN 0018-9456.
- [13] KINARD, J. R., NOVOTNY, D. B., LIPE, T. E., XUANG, D. X. Development of Thin-Film Multijunction Thermal Converters at NIST. *IEEE Trans. Instrum. and Meas.* 1997, vol. 46, no. 2, p. 347-351. ISSN 0018-9456.
- [14] SCARIONI, L., KLONZ, M., LAIZ, H., KAMPIK, M. High-frequency Thin Film Multijunction Thermal Converter on a Quartz Crystal Chip. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2003, vol. 52, no. 2, p. 345–349, 2003. ISSN 0018-9456.
- [15] SCARIONI, L., KLONZ, M., FUNCK, T., KESSLER, E. New Generation of Crystal Quartz Thin-Film Multijunction Thermal Converters. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2006, vol. 55, no. 6, p. 2281–2285. ISSN 0018-9456.
- [16] BUDOVSKY, I. Precision Measurement of Alternating Current. In *Proceedings National Conference of Standards Laboratories NCSL 2005 International Workshop and Symposium*. [CD-ROM]. Washington, D.C. (USA), 2005.

- [17] RYDLER, K.-E., TARASSO, V. Realization of AC-DC Current Transfer Difference to 1 MHz at SP. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2008*. Boulder (USA): NIST, 2008, p. 406-407. ISBN 978-1-4244-2400-9.
- [18] GARCOCZ, M., HEINE, G. AC-DC Current Transfer Difference at BEV. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2008*. Boulder (USA): NIST, 2008, p. 32-33. ISBN 978-1-4244-2400-9.
- [19] WILKINS, F.J. Theoretical Analysis of AC/DC Transfer Difference of the NPL Multijunction Thermal Converter over the Frequency Range DC to 100 kHz. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 1972, IM-21, p.334-340. ISSN 0018-9456.
- [20] KLONZ, M. *Entwicklung von Vielfachthermokonvertern zur genauen Rückführung von Wechselgrößen auf äquivalente Gleichgrößen*. PhD. Thesis. Braunschweig: TUB, 1997. ISBN 3-88314-631-5.
- [21] SCARIONI, L. *High-Frequency Thin-Film Multijunction Thermal Converter on a Quartz Crystal Chip*. PhD. Thesis. Braunschweig: TUB, 2003.
- [22] SCARIONI, L., KLONZ, M., FUNCK, T. Quartz Planar Multijunction Thermal Converter as a New AC-DC Current Transfer Standard up to 1 MHz. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2004*. London (UK): 2004, p. 455-456. ISBN 0-7803-8494-6.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] RYDLER, K. E., TARASSO, V. Extending AC-DC Current Transfer Measurements to 100 A, 100 kHz. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2008*. Boulder (USA): NIST, 2008, p. 28-29. ISBN 978-1-4244-2400-9.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] VOLJC, B., LINDIC, M., LAPUH, R. Direct Measurement of AC Current by Measuring the Voltage Drop on the Coaxial Current Shunt. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2009, vol. 58, no. 4, p. 863-867. ISSN 0018-9456.
- [31] 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.
- [32] 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](http://projects.npl.co.uk/power_energy).
- [33] 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.
- [34] GARCO CZ, 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.
- [35] GARCO CZ, 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](http://www.euramet.org).
- [36] GARCO CZ, 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](http://www.euramet.org).
- [37] WARD, D.A. Precision Measurement of AC Currents in the Range of 1 A to Greater than 100 kA Using Rogowski Coils. In *Proceedings of the British Electromagnetics Measurement Conference*, London (UK), 1985.
- [38] HALLSTROM, J., SUOMALAINEN, E. P. Rogowski Coil Setup for Calibration of AC Currents up to 10 kA. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2006*. Torino (Italy): C: L. U. T., 2006, p. 210-211. ISBN 88-7992-228-9.
- [39] DESTEFAN, D., RAMBOZ, J. D., WEISS, S. Rogowski Coil Based Systems to Support Utility and Power Industry Current Measurement Needs. In *Proceedings National Conference of Standards Laboratories NCSL 2007 International Workshop and Symposium*. [CD-ROM]. Saint Paul (USA), 2007.
- [40] SUOMALAINEN, E. P., HALLSTROM, J. On-site Calibration of a Current Transformer Using a Rogowski Coil. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2008*. Boulder (USA): NIST, 2008, p. 468-469. ISBN 978-1-4244-2400-9.
- [41] DJOKIC, B. Calibration of Rogowski Coils at Power Frequencies Using Digital Sampling. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2008*. Boulder (USA): NIST, 2008, p. 462-463. ISBN 978-1-4244-2400-9.

- [42] SO, E., BENNETT, D. A Multistage Technique for Current Transformers with Current Ratios of Less than Unity. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2008*. Boulder (USA): NIST, 2008, p. 464-465. ISBN 978-1-4244-2400-9.
- [43] CORNEY, A.C. A simple traceable current transformer calibration method. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2000*. Sydney (Australia): I.E.E.E.Press., 2000, p. 660-661. ISBN 0-7803-5744-2.
- [44] ZHANG, J., ZHANG, D., LU, O., ZHAO, Y., XU, Ch. Calculation and Self-calibration of the Ratio Errors of Single-stage Current Transformer with the Ratio 1:1 In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2006*. Torino (Italy): C.L.U.T., 2006, p. 208-209. ISBN 88-7992-228-9.
- [45] WILLIAMS, E. S. Thermal Current Converters for Accurate AC Current Measurement. *IEEE Trans. Instrum. and Meas.* 1976, IM-25, p. 519-523. ISSN 0018-9456.
- [46] KLONZ, M., LAIZ, H., SPIEGEL, T., BITTEL, P. AC-DC Current Transfer Step-up and Step-down Calibration and Uncertainty Calculation. *IEEE Trans. Instrum. and Meas.* 2002, vol. 51, no. 5, p. 1027-1034. ISSN 0018-9456.
- [47] RYDLER, K. E. High Precision Automated Measuring System for AC-DC Current Transfer Standards. *IEEE Trans. Instrum. and Meas.* 1993, vol. 42, no. 2, p. 608–611. ISSN 0018-9456.
- [48] BIPM: *Calibration and Measurement Capabilities*. [databáze online]. Paříž, BIPM. [cit. 12. 5. 2013]. Dostupné z URL: <http://kcdb.bipm.org/>. The BIPM key comparison database.
- [49] BUDOVSKY, I., GIBBES, A.M., ARTHUR D.C. A High-frequency Thermal Power Comparator. *IEEE Trans. Instrum. and Meas.* 1999, vol. 48, no. 2, p. 427-430. ISSN 0018-9456.
- [50] BUDOVSKY, I. Electrical Power Standard for Frequencies up to 200kHz. In *Proceedings National Conference of Standards Laboratories NCSL 2007 International Workshop and Symposium*. [CD-ROM]. Saint Paul (USA), 2007.
- [51] MOHNS, E. An Audio Frequency Multiplier with Planar Thermal Converters for Power Measurements. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2008*. Boulder (USA): NIST, 2008, p. 80-81. ISBN 978-1-4244-2400-9.
- [52] SVENSSON, S. *Power Measurement Techniques for Nonsinusoidal Conditions*. Goteborg: Chalmers University of Technology, 1999. 153 pages. ISBN 91-7197-760-0.
- [53] RAMM, G., MOSER, H., BRAUN, A. A New Scheme for Generating and Measuring Active, Reactive and Apparent Power at Power Frequencies with Uncertainties of  $2.5 \times 10^{-6}$ . *IEEE Trans. Instrum. and Meas.* 1999, vol. 48, no. 2, p. 422-426. ISSN 0018-9456.
- [54] PALAFOX, L., RAMM, G., BEHR, R., IHLENFELD, W. G. K., MOSER, H. Primary AC Power Standard Based on Programmable Josephson Junction Arrays. *IEEE Trans. Instrum. and Meas.* 2007, vol. 56, no. 2, p. 534-537. ISSN 0018-9456.

- 
- [55] PALAFOX, L., BEHR, R., IHLENFELD, W. G. K., MULLER, F. The Josephson Effect Based Primary AC Power Standard at PTB: Progress Report. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2008*. Boulder (USA): NIST, 2008, p. 482-483. ISBN 978-1-4244-2400-9.
  - [56] WALTRIP, B.C., GONG, B., NELSON, T.L., WANG, Y., BURROUGHS, C.J., RUFENACHT, A., BENZL, S.P., DRESSELHAUS, P.D. AC Power Standard Using a Programmable Josephson Voltage Standard. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2008*. Boulder (USA): NIST, 2008, p. 480-481. ISBN 978-1-4244-2400-9.
  - [57] IHLENFELD, W. G. K., DAUKE, K., SUCHY, A., RATHER, P. Three-phase Primary AC Power Sampling Standard with Improved Frequency Resolution. In *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM 2008*. Boulder (USA): NIST, 2008, p. 486-487. ISBN 978-1-4244-2400-9.
  - [58] 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.
  - [59] 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.
  - [60] 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](http://projects.npl.co.uk/power_energy).
  - [61] 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](http://projects.npl.co.uk/power_energy).
  - [62] 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.
  - [63] 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.
  - [64] 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.
  - [65] 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.
-

- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] SELBY, M. C. Accurate radio-frequency microvoltages. *AIEE Trans. Communication and Electronics.* 1953, vol. 72, p. 158-163.
- [69] NOVÁKOVÁ ZACHOVALOVÁ, V. On The Current Shunts Modeling. Odesláno do *IEEE Trans. Instrum. and Meas.* Stav: přijato.
- [70] ISO: *Guide to the Expression of Uncertainty of Measurement.* 1. vydání. 1993. ISBN 92-67-10188-9.
- [71] 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>.

## Seznam zkratk

|      |                                                                                      |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| AC   | alternating<br>(střídavý)                                                            |
| ACI  | alternating current<br>(střídavý proud)                                              |
| ACMS | AC measurement standard<br>(AC měřicí etalon)                                        |
| ACR  | alternating resistance<br>(střídavý odpor)                                           |
| ACV  | alternating voltage<br>(střídavé napětí)                                             |
| AGT  | active guarded transformer<br>(transformátor s aktivním stíněním)                    |
| BEV  | Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen<br>(rakouský národní metrologický institut) |
| BMF  | bulk metal foil (device)<br>(foliový typ součástek)                                  |
| C    | ceramics<br>(keramika)                                                               |
| CMC  | calibration and measurement capabilities<br>(kalibrační a měřicí schopnosti)         |
| ČMI  | Český metrologický institut                                                          |
| DC   | direct<br>(stejnoseměrný)                                                            |
| DCI  | direct current<br>(stejnoseměrný proud)                                              |
| DCR  | direct resistance<br>(stejnoseměrný odpor)                                           |
| DCV  | direct voltage<br>(stejnoseměrné napětí)                                             |
| DFT  | diskrétní Fourierova transformace                                                    |
| DMM  | digital multimeter<br>(digitální multimetr)                                          |
| DPS  | deska plošných spojů                                                                 |
| DSWM | digital sampling wattmeter<br>(Vzorkovací wattmetr)                                  |

|            |                                                                                                                                                                                                      |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| E-glass    | tkaná skelná vlákna                                                                                                                                                                                  |
| EURAMET    | European Association of National Metrology Institutes<br>(evropská asociace národních metrologických institutů)                                                                                      |
| GUM        | Guide to the Expression of Uncertainty of Measurement<br>(příručka pro vyjadřování nejistoty měření)                                                                                                 |
| H          | hydrocarbon<br>(uhlovodík)                                                                                                                                                                           |
| JV         | Justervesenet<br>(norský národní metrologický institut)                                                                                                                                              |
| JVS        | Josephson Voltage Standard<br>(Josephsonův kvantový etalon napětí)                                                                                                                                   |
| iMERA-EMRP | implementing Metrology in the European Research Area – European<br>Metrology Research Programme<br>(zavádění metrologie do evropského výzkumného programu –<br>evropský výzkumný program metrologie) |
| INRIM      | L'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica<br>(italský národní metrologický institut)                                                                                                               |
| MC         | Monte Carlo                                                                                                                                                                                          |
| MELF       | metal electrode leadless face (device)<br>(cylindrické povrchově pájené součástky)                                                                                                                   |
| MIKES      | Mittatekniikan Keskus<br>(finský národní metrologický institut)                                                                                                                                      |
| MJTC       | multijunction thermal converter<br>(mnohapřechodový termokonvertor)                                                                                                                                  |
| NMI        | národní metrologický institut                                                                                                                                                                        |
| NMIA       | National Measurement Institute<br>(australský národní metrologický institut)                                                                                                                         |
| NRC        | National Research Council<br>(kanadský národní metrologický institut)                                                                                                                                |
| PCR        | power coefficient of resistance<br>(výkonový koeficient odporu)                                                                                                                                      |
| PMJTC      | planar-type multijunction thermal converter<br>(planární mnohapřechodový termokonvertor)                                                                                                             |
| PPE (PPO)  | polyphenylenether (polyphenyl oxid)                                                                                                                                                                  |
| PTB        | Physikalisch-Technische Bundesanstalt<br>(německý národní metrologický institut)                                                                                                                     |
| PTFE       | polytetrafluoretylen, teflon                                                                                                                                                                         |
| QHS        | quantum Hall standard<br>(kvantový Hallův etalon odporu)                                                                                                                                             |
| R          | resin<br>(pryskyřice)                                                                                                                                                                                |

|       |                                                                                                 |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SC-LF | sub-committee – low frequency<br>(podskupina – nízké frekvence)                                 |
| SET   | single electron tunneling<br>(tunelování elektronů – kvantový etalon proudu)                    |
| SIQ   | Slovenski institut za kakovost in meroslovje<br>(slovinský národní metrologický institut)       |
| SJTC  | singlejunction thermal converter<br>(jednopřechodový termokonvertor)                            |
| SMD   | surface mount device<br>(povrchově pájené součástky)                                            |
| SP    | SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut<br>(švédský národní metrologický institut)              |
| TC    | thermal converter<br>(tepelný převodník, termokonvertor)                                        |
| TCR   | temperature coefficient of resistance<br>(teplotní koeficient odporu)                           |
| TC-EM | technical committee – Electricity and Magnetism<br>(technická komise – elektřina a magnetismus) |
| TP    | třída přesnosti                                                                                 |
| TR    | technický rozvoj                                                                                |
| ZR    | Zenerova reference (dc napětí)                                                                  |

## Seznam použitých symbolů

|                      |                                                                  |
|----------------------|------------------------------------------------------------------|
| $\delta$             | hloubka vniku                                                    |
| $\delta_{AC-DC}$     | ac-dc difference bočníku                                         |
| $\delta_{dut}$       | AC-DC difference kalibrovaného etalonu                           |
| $\delta_{meas}$      | rozdíl AC-DC diferencí kalibrovaného a referenčního etalonu      |
| $\delta_{ref}$       | AC-DC difference referenčního etalonu                            |
| $\Delta\varphi$      | rozdíl fáze mezi a kalibrovaným bočníkem a etalonem              |
| $\Delta C$           | změna kapacity                                                   |
| $\Delta l$           | změna vzdálenosti                                                |
| $\Delta P$           | změna výkonu                                                     |
| $\Delta R$           | změna odporu                                                     |
| $\Delta T$           | změny teploty                                                    |
| $\varepsilon_0$      | permitivita vakua                                                |
| $\varepsilon_{rca}$  | relativní permitivita vzduchu                                    |
| $\varepsilon_{rct}$  | relativní permitivita teflonu                                    |
| $\varepsilon_{rFR4}$ | relativní permitivita dielektrika DPS (FR4)                      |
| $\varphi$            | fázová chyba bočníku                                             |
| $\varphi_{sh}$       | fázová chyba kalibrovaného bočníku                               |
| $\Phi_1, \Phi_2$     | naměřené fázové rozdíly mezi bočníkem a etalonem s výměnou pozic |
| $\mu_0$              | permeabilita vakua                                               |
| $\mu_r$              | relativní permeabilita prostředí                                 |
| $\pi$                | Ludolfovo číslo                                                  |
| $\sigma_c$           | vodivost vnitřního vodiče konektoru                              |
| $\sigma_{Cu}$        | měrná vodivost mědi                                              |
| $\sigma_w$           | vodivost hliníku                                                 |
| $\omega$             | úhlová frekvence                                                 |
| $\hat{A}$            | celková kaskádní matice modelu bočníku                           |
| $\hat{A}_B$          | kaskádní matice dvojbranu příček                                 |
| $\hat{A}_{CI}$       | kaskádní matice dvojbranu vstupního konektoru                    |
| $\hat{A}_{CO}$       | kaskádní matice dvojbranu výstupního konektoru                   |
| $\hat{A}_I$          | kaskádní matice dvojbranu vstupních desek                        |

---

|                     |                                                                                                   |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\hat{A}_L$         | kaskádní matice dvojbranu zátěže                                                                  |
| $\hat{A}_O$         | kaskádní matice dvojbranu výstupní části bočníku                                                  |
| $\hat{A}_R$         | kaskádní matice dvojbranu rezistorů                                                               |
| $\hat{A}_S$         | kaskádní matice dvojbranu bočníku                                                                 |
| $c_{\varphi_e}$     | citlivostní koeficient příspěvku etalonu                                                          |
| $c_{\Delta\varphi}$ | citlivostní koeficient příspěvku etalonu fáze                                                     |
| $c_{\Delta P}$      | citlivostní koeficient příspěvku rozdílu výkonu                                                   |
| $c_{\Delta R}$      | citlivostní koeficient příspěvku rozdílu odporu                                                   |
| $c_{\Delta T}$      | citlivostní koeficient příspěvku rozdílu teploty                                                  |
| $c_{conn}$          | citlivostní koeficient příspěvku zapojení                                                         |
| $c_E$               | citlivostní koeficient příspěvku použitého etalonu                                                |
| $c_{Ed}$            | citlivostní koeficient příspěvku změny odporu etalonu od poslední kalibrace                       |
| $c_{Et}$            | citlivostní koeficient příspěvku změny odporu etalonu s teplotou                                  |
| $c_{fr}$            | citlivostní koeficient příspěvku vlivu frekvence                                                  |
| $c_{I_i}$           | citlivostní koeficient příspěvku vlivu procházejícího proudu                                      |
| $c_{level}$         | citlivostní koeficient příspěvku krokování                                                        |
| $c_{meas}$          | citlivostní koeficient příspěvku vlivu                                                            |
| $c_{ref}$           | citlivostní koeficient příspěvku AC-DC etalonu                                                    |
| $c_{set\ up}$       | citlivostní koeficient příspěvku měřicí sestavy                                                   |
| $c_{tem}$           | citlivostní koeficient příspěvku vlivu teploty                                                    |
| $c_{r_c}$           | citlivostní koeficient příspěvku stability DMM a nedostatečné kompenzace termoelektrických napětí |
| $c_{R_i}$           | citlivostní koeficient příspěvku naměřeného odporu                                                |
| $c_{R_U}$           | citlivostní koeficient příspěvku naměřeného poměru napětí                                         |
| $c_{Xt}$            | citlivostní koeficient příspěvku změny hodnoty odporu kalibrovaného bočníku s teplotou            |
| $C$                 | kapacita bočníku dle modelu SP                                                                    |
| $C_1$               | paralelní kapacita měřená ze vstupní části bočníku dle modelu JV                                  |
| $C_2$               | paralelní kapacita výstupní části bočníku dle modelu JV                                           |
| $C_b$               | kapacita jedné příčky                                                                             |
| $C_B$               | kapacita všech příček                                                                             |
| $C_{cb}$            | kapacita příček modelu bočníků SIQ                                                                |
| $C_{CI}$            | kapacita vstupního konektoru                                                                      |
| $C_{CO}$            | kapacita výstupního konektoru                                                                     |

---

---

|            |                                                                     |
|------------|---------------------------------------------------------------------|
| $C_d$      | kapacita mezi vstupními deskami                                     |
| $C_{do}$   | kapacita výstupní části                                             |
| $C_{ds}$   | kapacita jedné desky                                                |
| $C_i$      | kapacita zátěže s polovinou kapacity přívodních kabelů v modelu SP  |
| $C_{in}$   | kapacita zátěže v modelu SP                                         |
| $C_{id}$   | kapacita vstupní části modelu bočníků SIQ                           |
| $C_s$      | kapacita bočníku s polovinou kapacity přívodních kabelů v modelu SP |
| $C_k$      | kapacita kruhu                                                      |
| $C_{ld}$   | kapacita přívodních kabelů v modelu SP                              |
| $C_{od}$   | kapacita výstupní části modelu bočníků SIQ                          |
| $C_r$      | kapacita jednoho rezistoru                                          |
| $C_R$      | celková kapacita rezistorů osazených v bočníku                      |
| $C_{vz}$   | kapacita vzduchové mezery                                           |
| $d_a$      | velikost vzduchové mezery mezi kruhem a deskou                      |
| $d_b$      | tloušťka DPS                                                        |
| $d_d$      | je vzdálenost Cu vrstev dvou desek                                  |
| $d_e$      | tloušťka elementu                                                   |
| $dt$       | změna času                                                          |
| $f$        | frekvence                                                           |
| $I(t)$     | okamžitá hodnota střídavého proudu                                  |
| $I_1, I_2$ | proud procházející bočníkem                                         |
| $I_{AC}$   | efektivní hodnota střídavého proudu                                 |
| $I_{DC}$   | stejnosměrný proud                                                  |
| $I_{in}$   | vstupní proud                                                       |
| $k$        | poměr vzdálenosti spojů mikropáskového vedení k jejich šířce        |
| $l_b$      | délka příčky                                                        |
| $l_{br1}$  | délka zúžené části příčky                                           |
| $l_{br2}$  | délka širší části příčky                                            |
| $l_{ca}$   | délka konektoru se vzduchovou mezerou                               |
| $l_{ct}$   | délka konektoru s teflonovým dielektrikem                           |
| $l_c$      | celková délka konektoru                                             |
| $l_d$      | rozměr desky                                                        |
| $l_e$      | délka elementu                                                      |
| $l_w$      | délka drátku                                                        |
| $L$        | indukčnost bočníku dle modelu SP                                    |

---

---

|            |                                                                                         |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| $L_1$      | sériová indukčnost měřená ze vstupní části bočnicku dle modelu JV                       |
| $L_b$      | indukčnost jedné příčky                                                                 |
| $L_B$      | indukčnost všech příček                                                                 |
| $L_{CI}$   | indukčnost vstupního konektoru                                                          |
| $L_{CO}$   | indukčnost výstupního konektoru                                                         |
| $L_d$      | indukčnost desky                                                                        |
| $L_{eq}$   | ekvivalentní indukčnost bočnicku dle modelu SP                                          |
| $L_k$      | indukčnost kruhu                                                                        |
| $L_{ld}$   | indukčnost přívodních kabelů v modelu SP                                                |
| $L_p$      | sériová indukčnost výstupní části bočnicku dle modelu JV                                |
| $L_s$      | sériovou indukčnost rezistoru bočnicku dle modelu JV                                    |
| $L_r$      | indukčnost jednoho rezistoru                                                            |
| $L_R$      | celková indukčnost rezistorů osazených v bočnicku                                       |
| $L_w$      | indukčnost drátku                                                                       |
| $n$        | mocninný koeficient termokonvertoru                                                     |
| $n_b$      | počet příček                                                                            |
| $n_r$      | počet rezistorů na příčce                                                               |
| $P_1, P_2$ | výkon ztracený na bočnicku                                                              |
| $PCR_{sh}$ | výkonový koeficient odporu bočnicku                                                     |
| $r_{1c}$   | vnitřní poloměr konektoru                                                               |
| $r_{2c}$   | vnější poloměr konektoru                                                                |
| $r_{c1}$   | vnitřní poloměr kruhu                                                                   |
| $r_{c2}$   | vnitřní poloměr mezikruží                                                               |
| $r_{c3}$   | vnější poloměr mezikruží                                                                |
| $r_w$      | poloměr drátku                                                                          |
| $R$        | odpor bočnicku dle modelu SP, JV                                                        |
| $R_1, R_2$ | naměřený stejnosměrný odpor bočnicku při různých teplotách (nebo procházejícím proudem) |
| $R_b$      | odpor jedné příčky                                                                      |
| $R_B$      | odpor všech příček                                                                      |
| $R_{Bp}$   | celkový svodový odpor všech příček                                                      |
| $R_{CI}$   | odpor vstupního konektoru                                                               |
| $R_{CO}$   | odpor výstupního konektoru                                                              |
| $R_d$      | odpor desky                                                                             |
| $R_{dp}$   | svodový odpor mezi vstupními deskami                                                    |

---

---

|                        |                                                                                                                    |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $R_{dpo}$              | svodový odpor výstupní části                                                                                       |
| $R_E$                  | odpor referenčního etalonu                                                                                         |
| $R_{in}$               | odpor zátěže v modelu SP                                                                                           |
| $R_{iac}$              | odporové ztráty v konstrukci při vstupním AC proudu dle modelu JV                                                  |
| $R_{idc}$              | odporové ztráty v konstrukci při vstupním AC proudu dle modelu JV                                                  |
| $R_k$                  | odpor kruhu                                                                                                        |
| $R_{ld}$               | odpor přívodních kabelů v modelu SP                                                                                |
| $R_{pac}$              | paralelní odpor způsobený dielektrickými ztrátami dle modelu JV                                                    |
| $R_r$                  | odpor jednoho rezistoru                                                                                            |
| $R_R$                  | celkový odpor rezistorů osazených v bočníku                                                                        |
| $R_t$                  | vstupní odpor termokonvertoru dle modelu JV                                                                        |
| $R_U$                  | poměr výstupních napětí kalibrovaného a referenčního etalonu                                                       |
| $R_w$                  | odpor drátku                                                                                                       |
| $R_X$                  | odpor kalibrovaného etalonu                                                                                        |
| $S_b$                  | plocha příčky                                                                                                      |
| $S_{br1}$              | plocha průřezu Cu vrstvy DPS                                                                                       |
| $S_{br2}$              | plocha průřezu Cu vrstvy příčky ve zúžených místech                                                                |
| $S_c$                  | průřez vnitřního vodiče konektoru                                                                                  |
| $S_d$                  | povrch desky                                                                                                       |
| $S_w$                  | průřez drátku                                                                                                      |
| $t$                    | čas                                                                                                                |
| $t_d$                  | tloušťka Cu vrstvy DPS                                                                                             |
| $\tan \delta$          | ztrátový činitel dielektrika DPS (FR4)                                                                             |
| $T$                    | perioda                                                                                                            |
| $T_1, T_2$             | teplota v klimakomoře                                                                                              |
| $TCR_{sh}$             | teplotní koeficient odporu bočníku                                                                                 |
| $u^2(\delta_{conn})$   | představuje vliv zapojení k nejistotě měření AC-DC difference                                                      |
| $u^2(\delta_{dut})$    | kombinovaná (standardní) nejistota měření AC-DC difference                                                         |
| $u^2(\delta_{fr})$     | příspěvek frekvenční závislosti k nejistotě měření AC-DC difference                                                |
| $u^2(\delta_{meas})$   | příspěvek od naměřené difference mezi referenčním a kalibrovaným etalonem (směrodatná odchylka) k nejistotě měření |
| $u^2(\delta_{ref})$    | příspěvek od AC-DC etalonu k nejistotě měření                                                                      |
| $u^2(\delta_{set up})$ | příspěvek od měřicí sestavy k nejistotě měření                                                                     |
| $u^2(\delta_{tem})$    | příspěvek teplotní závislosti k nejistotě měření AC-DC difference                                                  |
| $u^2(\delta\Delta P)$  | příspěvek změny (rozdílu) výkonu k nejistotě měření                                                                |

---

---

|                                                     |                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $u^2(\delta\Delta R)$                               | příspěvek změny (rozdílu) odporu k nejistotě měření                                                            |
| $u^2(\delta\Delta T)$                               | příspěvek změny (rozdílu) teploty k nejistotě měření                                                           |
| $u^2(\delta I_i)$                                   | příspěvek vlivu procházejícího proudu k nejistotě měření                                                       |
| $u^2(\delta P_i), u^2(\delta P_1), u^2(\delta P_2)$ | příspěvek výkonu ztraceného na bočniku k nejistotě měření                                                      |
| $u^2(\delta PCR_{sh})$                              | kombinovaná (standardní) nejistota měření PCR bočniku                                                          |
| $u^2(\delta R_1), u^2(\delta R_2)$                  | příspěvek naměřených odporů k nejistotě měření                                                                 |
| $u^2(\delta r_c)$                                   | příspěvek stability DMM a nedostatečné kompenzace termoelektrických napětí k nejistotě měření                  |
| $u^2(\delta R_E)$                                   | příspěvek kalibrace použitého etalonu k nejistotě měření                                                       |
| $u^2(\delta R_{Ed})$                                | příspěvek vlivu změny hodnoty odporu etalonu od poslední kalibrace k nejistotě měření                          |
| $u^2(\delta R_{Et})$                                | příspěvek vlivu změny hodnoty odporu etalonu s teplotou k nejistotě měření                                     |
| $u^2(\delta R_U)$                                   | příspěvek naměřeného poměru napětí (směrodatná odchylka) k nejistotě měření                                    |
| $u^2(\delta R_X)$                                   | kombinovaná (standardní) nejistota měření stejnosměrného odporu                                                |
| $u^2(\delta R_{Xt})$                                | příspěvek vlivu změny hodnoty odporu kalibrovaného bočniku s teplotou k nejistotě měření                       |
| $u^2(\delta T_1), u^2(\delta T_2)$                  | příspěvek naměřených teplot k nejistotě měření                                                                 |
| $u^2(\delta TCR_{sh})$                              | kombinovaná (standardní) nejistota měření TCR bočniku                                                          |
| $u^2(\Delta\varphi)$                                | příspěvek fázového rozdílu (směrodatná odchylka) k nejistotě měření                                            |
| $u^2(\varphi_e)$                                    | standardní nejistota měření etalonu fázové chyby                                                               |
| $u^2(\varphi_{level})$                              | příspěvek krokování k nejistotě měření                                                                         |
| $u^2(\varphi_{sh})$                                 | standardní nejistota měření fázové chyby bočniku                                                               |
| $U_{oac}$                                           | hodnota výstupního napětí termokonvertoru při vstupním AC proudu                                               |
| $U_{odc}$                                           | aritmetický průměr hodnoty výstupního napětí termokonvertoru při kladné a záporné polaritě vstupního DC proudu |
| $U_{out}$                                           | výstupní napětí                                                                                                |
| $w_b$                                               | šířka příčky                                                                                                   |
| $Z$                                                 | impedance bočniku dle modelu SP                                                                                |
| $Z_1$                                               | impedance příček a výstupní části modelu bočníků SIQ                                                           |
| $Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6$                           | impedance částí modelu JV                                                                                      |
| $Z_{res}$                                           | impedance vodivosti $R_d$ a rezistorů modelu bočníků SIQ                                                       |
| $\hat{Z}_T$                                         | přenosová impedance                                                                                            |
| $Z_{Tm}$                                            | modul přenosové impedance                                                                                      |
| $Z_{vb}$                                            | impedance mikropáskového vedení tvořeného příčkou                                                              |

---