

Michal Satori<sup>1</sup>

## **Frekvenční závislost chyby převodu a úhlu přístrojových transformátorů s izolačním napětím 123 kV v rozvodně 110 kV, trakční napájecí stanice 25 kV, 50 Hz**

**Klíčová slova:** *přístrojový transformátor, přístrojový transformátor proudu, přístrojový induktivní transformátor napětí, přístrojový kapacitní transformátor napětí, chyba převodu, chyba úhlu, frekvenční závislost chyby převodu a úhlu, vyšší harmonické*

### **1 Úvod**

Trakční napájecí stanice 25 kV, 50 Hz (dále jen TNS 25 kV, 50 Hz) napájí zejména trakční vedení jednofázové trakční proudové soustavy 25 kV, 50 Hz. Většina TNS 25kV, 50Hz má dva nezávislé přívody z distribuční soustavy 110 kV. Hlavní část TNS 25 kV, 50 Hz tvoří rozvodna 110 kV (dále jen R 110 kV) a rozvodna 25 kV (dále jen R 25 kV).

V R 110 kV jsou umístěny přístrojové transformátory napětí a proudu s izolačním napětím 123 kV, které jsou vždy induktivního charakteru, ale jelikož jsou některé R 110 kV částečně v majetku distributora elektrické energie, nelze vyloučit instalaci přístrojového kapacitního transformátoru napětí s izolačním napětím 123 kV v R 110 kV distributorem elektrické energie. Přístrojové transformátory napětí a proudu v R 110 kV mají většinou dvě sekundární vinutí (měření, jištění), přičemž sekundární vinutí pro měření je zaplombované, jelikož slouží jako vstup pro fakturační měření. Přístrojový transformátor v R 110 kV je tedy „měřidlem stanoveným“. Tato měřidla podléhají zákonu č.505/1990Sb (zákon o metrologii) a kromě schválení typu a ověření musí sekundární vinutí pro měření splňovat minimální třídu přesnosti  $T_P = 0,2$ . Přístrojové transformátory zajišťují fakturační měření pro statické elektroměry činné a jalové energie, které osazuje v TNS 25 kV, 50 Hz distributor elektrické energie. Statické elektroměry mohou vyhodnocovat i procentní obsah napěťových popř. proudových harmonických v odběru, tedy v připojovacím bodě TNS 25 kV, 50 Hz.

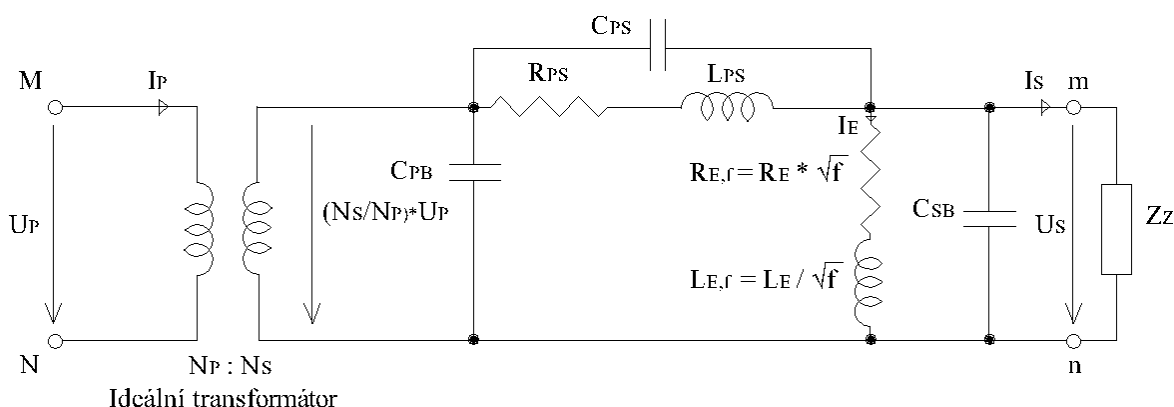
---

<sup>1</sup> Ing. Michal SATORI, 1978, Univerzita Pardubice – Dopravní fakulta Jana Pernera, Dopravní infrastruktura, Systémový inženýr Elektrizace železnic Praha, a.s., externí doktorand UPa - DFJP

Maximální meze napěťových popř. proudových harmonických a další požadavky na kvalitu odběru stanovuje distributor elektrické energie pro střední a velké odběry v připojovacích podmínkách. Distributor elektrické energie tak určuje požadavky na kvalitu odběru, aby sám mohl garantovat odběratelům elektrické energie dodávku elektrické energie s parametry, které jsou v souladu s normou [1]. Požadavky v připojovacích podmínkách se mění nejen v čase, ale zejména jsou různé u každého distributora elektrické energie. ČEZ stanovuje meze procentního obsahu napěťových harmonických do řádu 19. v připojovacím bodě a sleduje i dodržování maximální povolené hodnoty THD. E.ON stanovuje meze obsahu proudových harmonických do řádu 19. v připojovacím bodě a sleduje i dodržování maximální povolené hodnoty THD.

Za účelem posouzení korektnosti měřených hodnot napěťových popř. proudových harmonických v připojovacím bodě TNS 25 kV, 50 Hz je nutné posoudit frekvenční závislost chyby převodu a úhlu přístrojových transformátorů napětí a proudu s izolačním napětím 123 kV v R 110 kV. Pokud by výsledek měření obsahu napěťových popř. proudových harmonických v připojovacím bodě TNS 25 kV, 50 Hz měl být respektován odběratelem elektrické energie, musela by se chyba převodu a úhlu přístrojových transformátorů, v sledovaném frekvenčním pásmu, pohybovat v povolených tolerančních mezích stanovených normou [2, 3, 4] pro třídu přesnosti  $T_P = 0,2$ . Norma [2, 3, 4] uvažuje pouze sinusový průběh primárního napětí a proudu a chybu převodu a úhlu přístrojových transformátorů napětí a proudu definuje při jmenovité frekvenci 50 Hz s povoleným kolísáním  $\pm 2$  Hz. Jelikož dodavatel elektrické energie sleduje procentní obsahy harmonických v připojovacím bodě do řádu 19. harmonické a významný vliv na hodnotu THD mohou mít složky do řádu 40. Harmonické, bude v článku sledováno frekvenční pásmo maximálně do řádu 100. harmonické (5kHz).

V zahraniční literatuře je řešena otázka frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojových transformátorů již od osmdesátých let minulého století, kdy bylo zdrojem [5] odvozeno náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí s izolačním napětím 7,2 kV platné pro frekvence do 10 kHz.



**Obrázek 1.1** - Náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí s izolačním napětím 7,2 kV platné pro frekvence do 10 kHz [5]

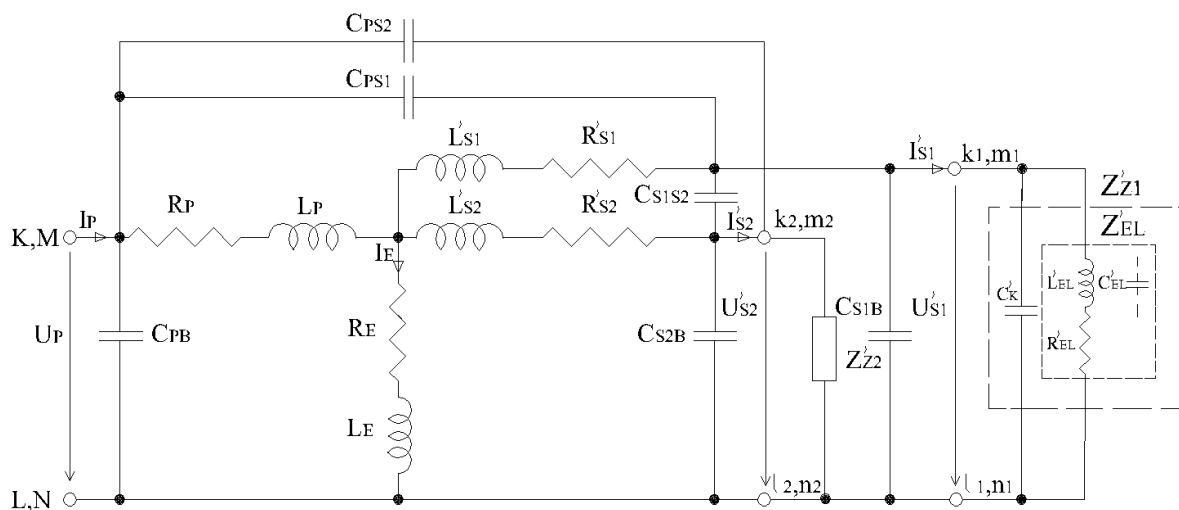
- kde:  $R_{PS}$  odpor primárního a sekundárního vinutí [ $\Omega$ ]  
 $L_{PS}$  rozptylová indukčnost primárního a sekundárního vinutí [F]  
 $C_{PS}$  kapacita mezi primárním a sekundárním vinutím [F]  
 $C_{PB}$  kapacita mezi primárním vinutím a kostrou [F]  
 $C_{SB}$  kapacita mezi sekundárním vinutím a kostrou [F]  
 $R_{E,f}$  frekvenčně závislý odpor reprezentující ztráty hysterezní a vířivé ve spojce a jádru [ $\Omega$ ]  
 $L_{E,f}$  frekvenčně závislá magnetizační indukčnost spojky a jádra [H]

Pro frekvenčně závislé prvky magnetizační větve platí vztahy:

$$R_{E,f} = R_E \cdot f^{K_R} [\Omega] ; L_{E,f} = L_E \cdot f^{K_L} [H] \quad (1)$$

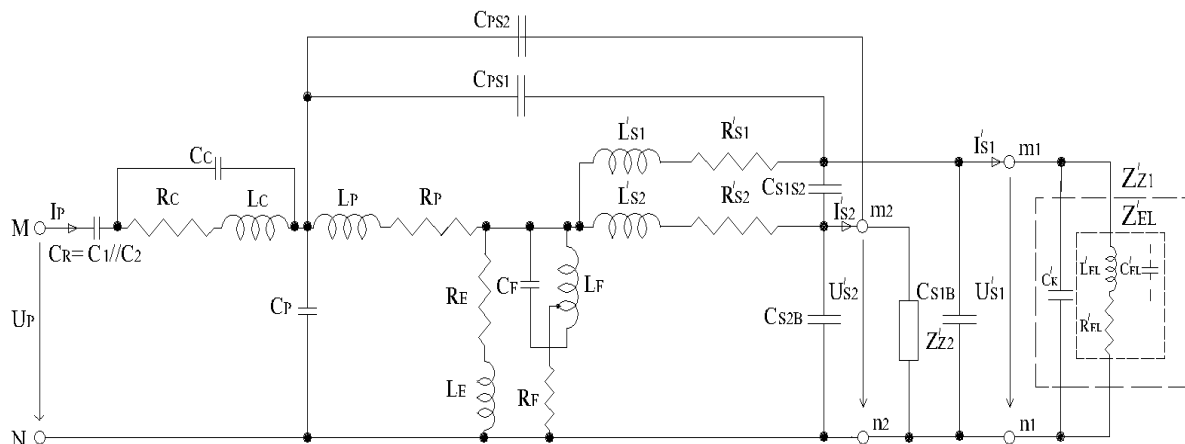
- kde:  $R_E$  hodnota odporu reprezentující ztráty hysterezní a vířivé v spojce a jádru [ $\Omega$ ]  
 $L_E$  hodnota magnetizační indukčnosti spojky a jádra [H]  
 $K_R$  exponent definující frekvenční závislost odporu magnetizační větve [-]  
 $K_L$  exponent definující frekvenční závislost indukčnosti magnetizační větve [-]

Z náhradního schématu na **obrázku 1.1** vychází i náhradní schéma přístrojových induktivních transformátorů napětí a proudu s izolačním napětím 123 kV odvozené zdrojem [6, 7] pro frekvence do 5 kHz viz. **obrázek 1.2**.



**Obrázek 1.2** - Náhradní schéma přístrojových induktivních transformátorů napětí a proudu s izolačním napětím 123 kV platné pro frekvence do 5 kHz s dvěma sekundárními vinutími (měření, jištění) [6, 7]

Na **obrázku 1.3** je náhradní schéma přístrojového kapacitního transformátoru napětí s izolačním napětím 123 kV platné pro frekvence do 5 kHz [8].



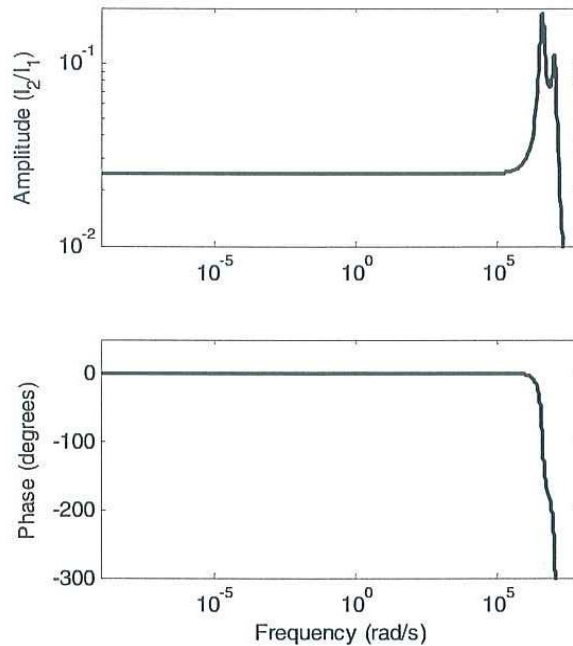
**Obrázek 1.3** - Náhradní schéma přístrojového kapacitního transformátoru napětí s izolačním napětím 123 kV platné pro frekvence do 5 kHz s dvěma sekundárními vinutími (měření, jištění) [8]

Kde:	$C_R$	celková kapacita kondenzátorů $C_1$ a $C_2$ [F]
	$L_C$	indukčnost kompenzační tlumivky [H]
	$R_C$	odpor kompenzační tlumivky [ $\Omega$ ]
	$C_C$	kapacita kompenzační tlumivky [F]
	$L_P$	rozptylová indukčnost středněnapětového transformátoru přepočítaná na primární stranu [H]
	$R_P$	odpor středněnapětového transformátoru přepočítaný na primární stranu [ $\Omega$ ]
	$R_E$	odpor reprezentující ztráty hyst. a vířivé ve spojkce a jádru [ $\Omega$ ]
	$L_E$	magnetizační indukčnost spojkky a jádra [H]
	$C_{PB}$	kapacita středněnapětového transformátoru proti kostře [F]
	$C_{PS}$	kapacita mezi primárním a sekundárním vinutím [F]
	$C_{S1S2}$	kapacita mezi sekundárním vinutím $S_1$ a $S_2$ [F]
	$C_{SB1}, C_{SB2}$	kapacita sekundárního vinutí $S_1, S_2$ proti kostře [F]
	$C_F$	kapacita tlumícího zařízení [F]
	$L_F$	indukčnost tlumícího zařízení [H]
	$R_F$	odpor tlumícího zařízení [ $\Omega$ ]
	$L'_{S1}, L'_{S2}$	rozptylová indukčnost prvního (druhého) sekundárního vinutí přepočítaná na primární stranu [H]
	$R'_{S1}, R'_{S2}$	činný odpor prvního (druhého) sekundárního vinutí přepočítaný na primární stranu [ $\Omega$ ]

Hodnoty prvků náhradních schémat na **obrázku 1.2** a **1.3** byly převzaty z dostupné literatury, jelikož měření na této napěťové hladině je technicky i finančně náročné zabezpečit.

### Přístrojový induktivní transformátor proudu

Z náhradního schématu přístrojového induktivního transformátoru proudu na **obrázku 1.2** byl získán průběh frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru proudu, který je zobrazen na **obrázku 1.4** [6].



**Obrázek 1.4** - a) Frekvenční závislost chyby převodu, b) úhlu přístrojového induktivního transformátoru proudu s izolačním napětím 123 kV [6]

Z **obrázku 1.4** je zřejmé, že chyba převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru proudu je frekvenčně nezávislá do 16 kHz. Tento závěr je ale platný pouze pro případ, kdy je sycení feromagnetického obvodu v lineární oblasti magnetizační křivky. Přístrojový transformátor proudu má zvlášť feromagnetický obvod (prstenec) pro sekundární vinutí měřící a jistící. Feromagnetický obvod sekundárního vinutí pro měření se přitom přesytí při ca. (3 až 4)  $\times I_n$  a feromagnetický obvod sekundárního vinutí pro jistění při ca. (10 až 15)  $\times I_n$ . Tyto hodnoty primárního proudu jsou běžně překročeny pouze při zkratu, tedy ne za běžných provozních podmínek. Vzhledem k povoleným procentním hodnotám proudových harmonických v připojovacím bodě TNS 25 kV, 50 Hz je vyloučené, aby se jejich vlivem přesytily feromagnetický obvod přístrojového transformátoru proudu.

Malý vliv na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru proudu může mít pouze změna hodnoty frekvenčně závislých prvků magnetizační větve ( $L_E$ ,  $R_E$ ) a změna hodnoty kapacit mezi primárním a sekundárním vinutím ( $C_{PS1}$ ,  $C_{PS2}$ ). To odpovídá faktu, že přístrojový induktivní transformátor proudu má primární vinutí tvořené jedním až třemi závity a je možné tedy vliv primárních prvků ( $R_P$ ,  $L_P$ ) zanedbat.

Z průběhu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu na **obrázku 1.4** je zřejmé, že přístrojový induktivní transformátor proudu je vhodný k měření vyšších proudových harmonických v připojovacím bodě TNS 25 kV, 50 Hz ve frekvenčním

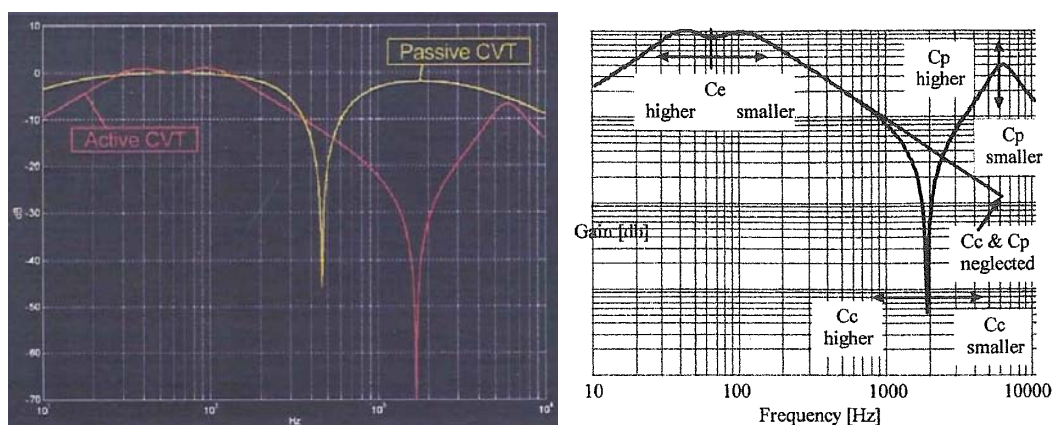
pásmu do 5 kHz, protože jeho chyba převodu a úhlu je v tomto pásmu frekvenčně nezávislá.

### Přístrojový induktivní transformátor napětí

Z dosavadních výzkumů frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí s izolačním napětím 7,2 - 27,5 kV a 123 kV [5, 7, 9] vyplynulo, že ve sledovaném frekvenčním pásmu bude chyba převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí s izolačním napětím 123 kV frekvenčně závislá, proto bude v **kapitole 2** proveden výzkum frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí s izolačním napětím 123 kV pomocí simulačního programu PSpice.

### Přístrojový kapacitní transformátor napětí

Přístrojový kapacitní transformátor napětí vykazuje nejvyšší frekvenční závislost chyby převodu a úhlu viz **obrázek 1.5** Chyba převodu a úhlu překračuje povolenou mez již od 52 Hz resp. 100 Hz výše (pohyb v tomto rozmezí ovlivňuje typ použitého tlumícího zařízení, požadovaná třída přesnosti).



**Obrázek 1.5** - a) Frekvenční závislost chyby převodu přístrojového kapacitního transformátoru napětí s izolačním napětím 123 kV [8], b) vliv změny hodnoty prvků náhradního schématu na průběh frekvenční závislosti chyby převodu přístrojového kapacitního transformátoru napětí [9]

Podstatný vliv na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu má změna hodnot všech kapacit náhradního schématu (viz **obrázek 1.3**) jak je zřejmé z průběhu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu na **obrázku 1.5**. Ve frekvenčním pásmu do 5 kHz tak má převažující vliv na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu kombinace hodnot LC, které kmitají na vyšších harmonických. Povolená mez chyby převodu a úhlu je vlivem vysoké frekvenční závislosti překročena již v okolí jmenovité frekvence a maximum amplitudy chyby převodu a úhlu je v okolí řádu 20. harmonické (chyba převodu překročena 225 - 350krát v závislosti na typu tlumícího zařízení).



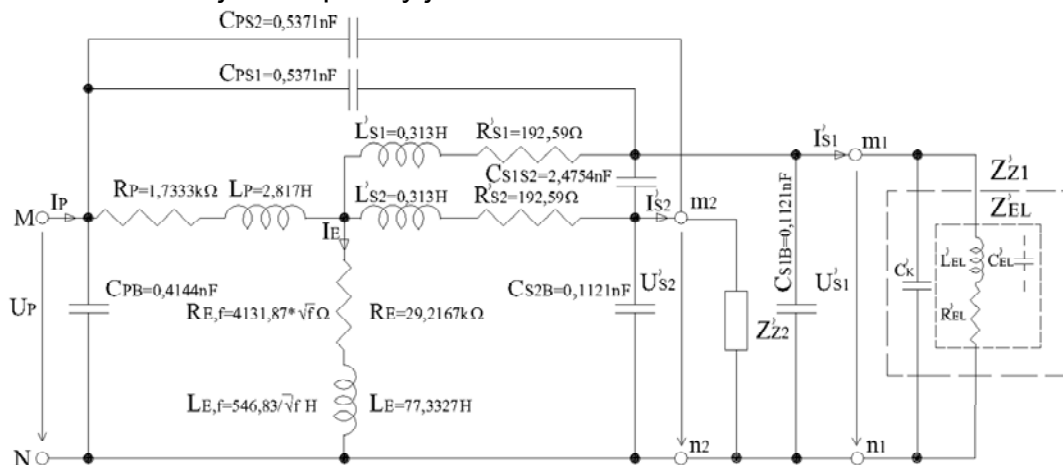
## 2 Frekvenční závislost chyby převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí s izolačním napětím 123 kV

Zdroj [7] určil hodnoty prvků náhradního schématu na **obrázku 1.2** měřením na konkrétním přístrojovém induktivním transformátoru napětí typu ABB EMFC 145 kV.

Zdroj [7] uvažuje prvky magnetizační větve jako frekvenčně nezávislé, což je předpoklad, který není správný pro výzkum frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu, zvláště ve frekvenčním pásmu do 5 kHz, kde frekvenční závislost prvků magnetizační větve ovlivní frekvenční závislost chyby převodu a úhlu. Z tohoto důvodu, byla doplněna frekvenční závislost prvků magnetizační větve podle **rovnice 1**. To je možné na základě výzkumu, který ověřil, že hodnota koeficientu  $K_R = + 0,5$  a hodnota koeficientu  $K_L = - 0,5$  se nemění v širokém rozsahu izolačních napětí přístrojových induktivních transformátorů napětí [10]. Pro možnost porovnání budou simulací vyhotoveny průběhy frekvenční závislosti při uvažování i zanedbání frekvenční závislosti prvků magnetizační větve. Porovnáním průběhů bude zřejmé, že frekvenční závislost prvků magnetizační větve není možné ve frekvenčním pásmu do 5 kHz zanedbat.

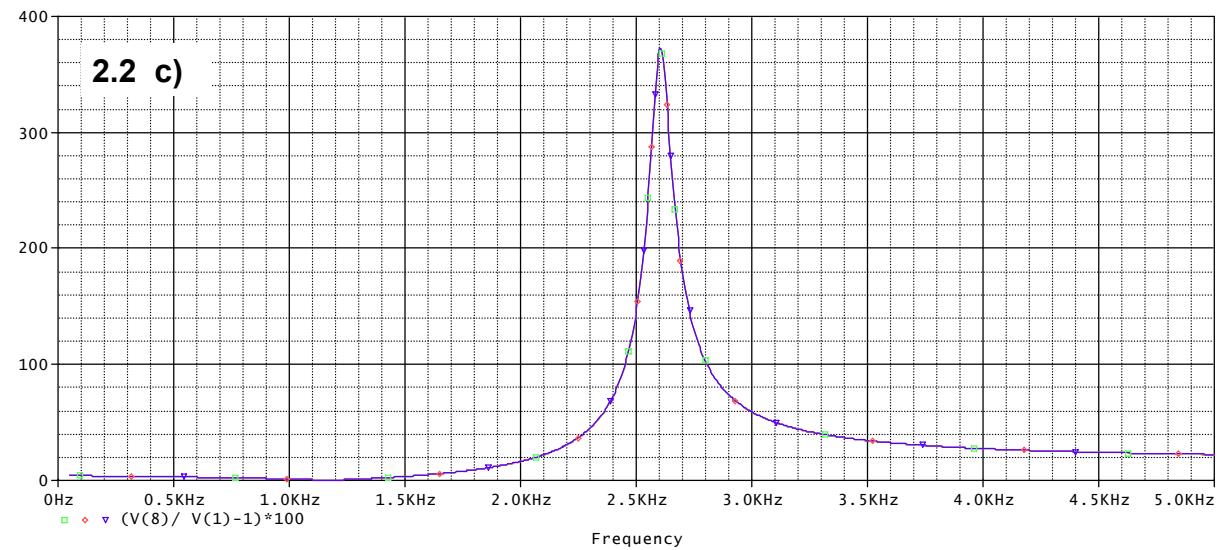
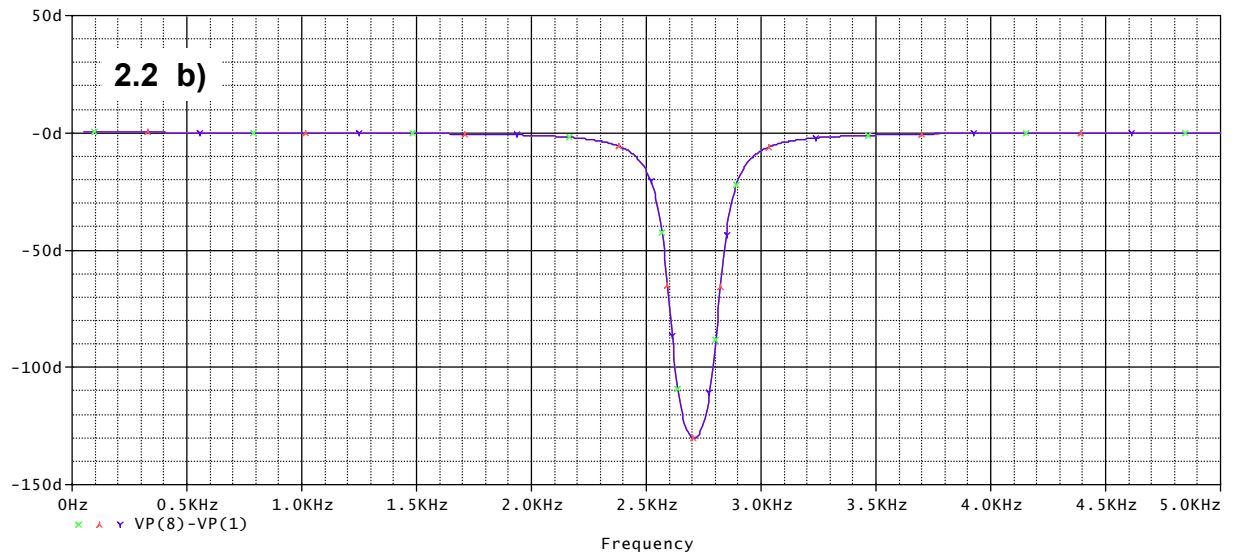
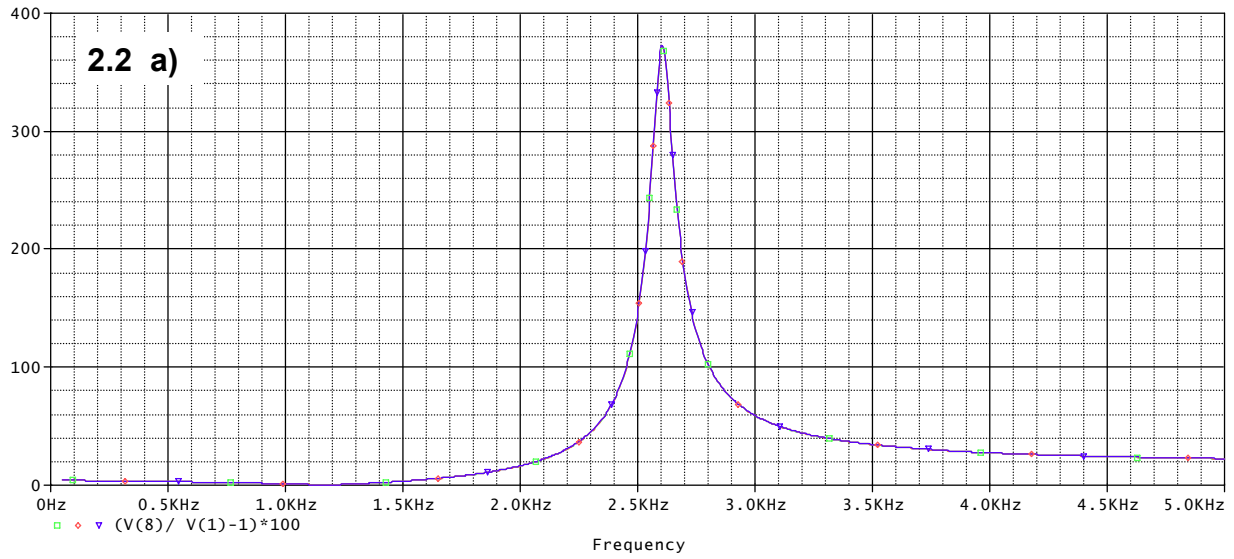
Dále autor [7] uvažuje sériové řazení prvků magnetizační větve, což je v souladu s náhradním schématem na **obrázku 1.1**. Toto zjednodušení tedy bylo přijato.

Na **obrázku 2.1** je zobrazeno náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí s doplněnými hodnotami prvků [7], přičemž hodnoty prvků magnetizační větve jsou doplněny jako frekvenčně závislé / nezávislé.

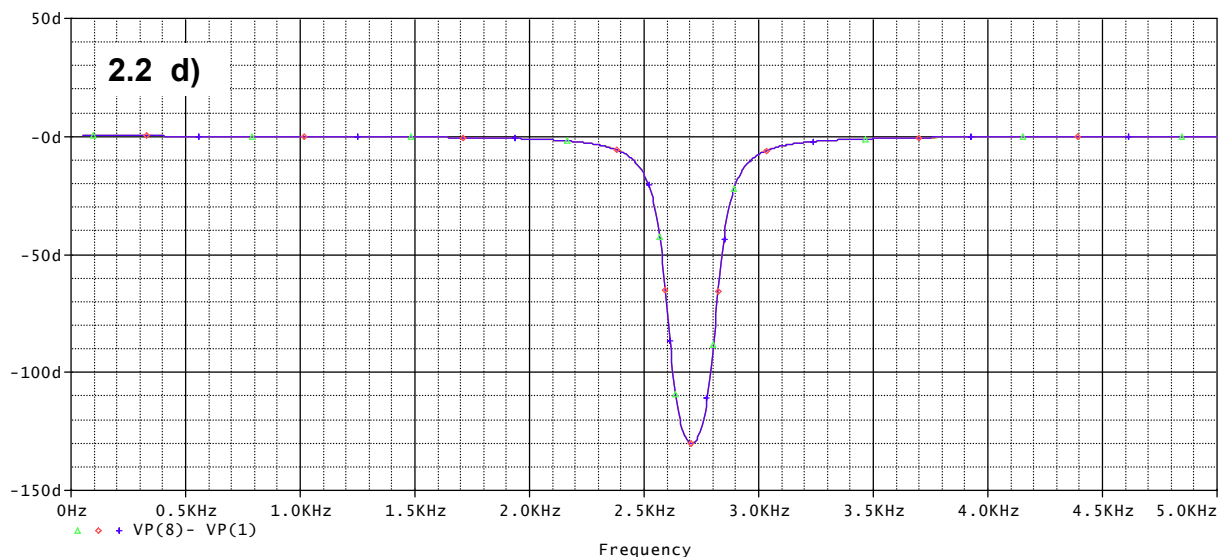


**Obrázek 2.1** - Hodnoty prvků náhradního schématu přístrojového induktivního transformátoru napětí 123kV [7] při uvažování / zanedbání frekvenční závislosti prvků magnetizační větve

Výsledné grafy frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí typu ABB EMFC 145 jsou na **obrázku 2.2**. Přičemž je uvažována zátěž sekundárního vinutí pro měření v podobě dvou typů statických elektroměrů (KWZ představuje zátěž odporově - kapacitní [11], ZMD zátěž odporově - indukční [11]) běžně používaných k fakturačnímu měření v TNS 25 kV, 50 Hz a je uvažován vliv proměnné kapacity přívodní kabeláže v takovém rozmezí, aby byla pokryta většina případů délek kabeláží v konkrétních TNS 25 kV, 50 Hz.







**Obrázek 2.2** - Frekvenční závislost chyby převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí typu ABB EMFC 145 s vnějším břemenem:

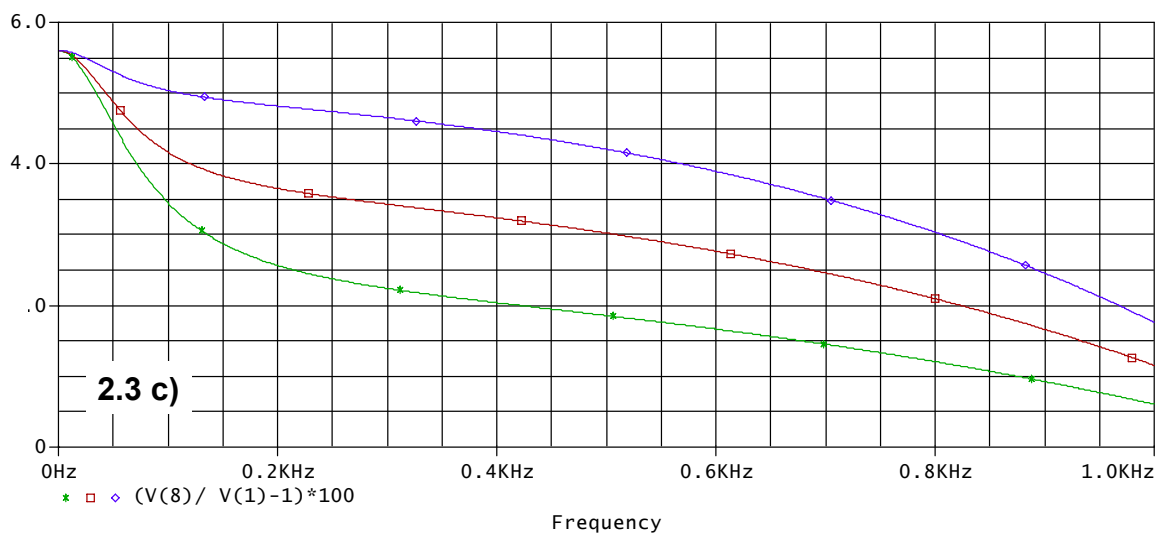
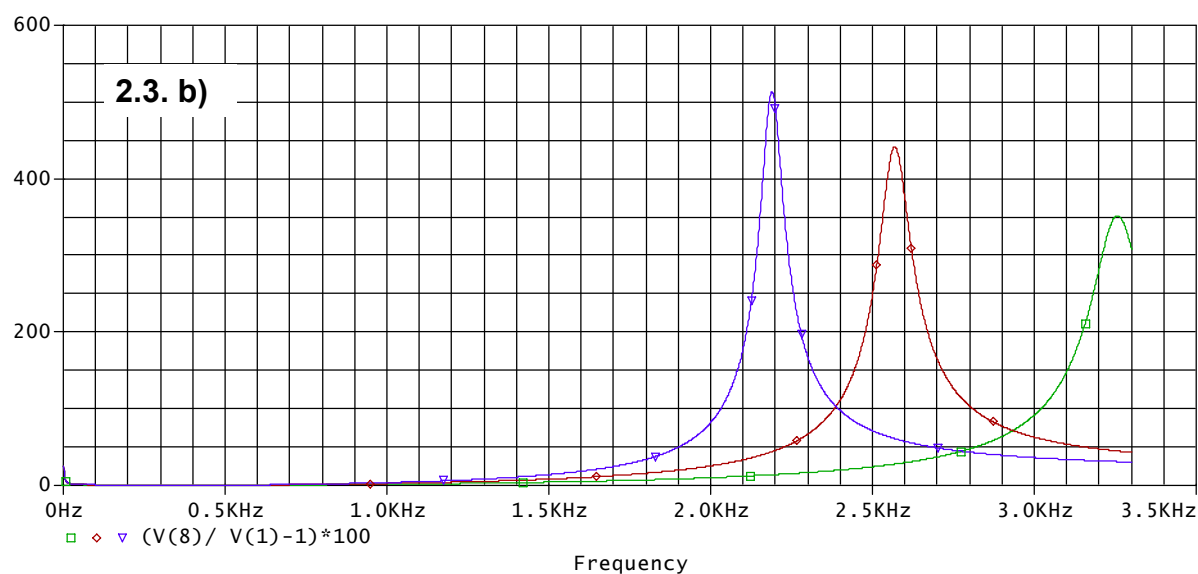
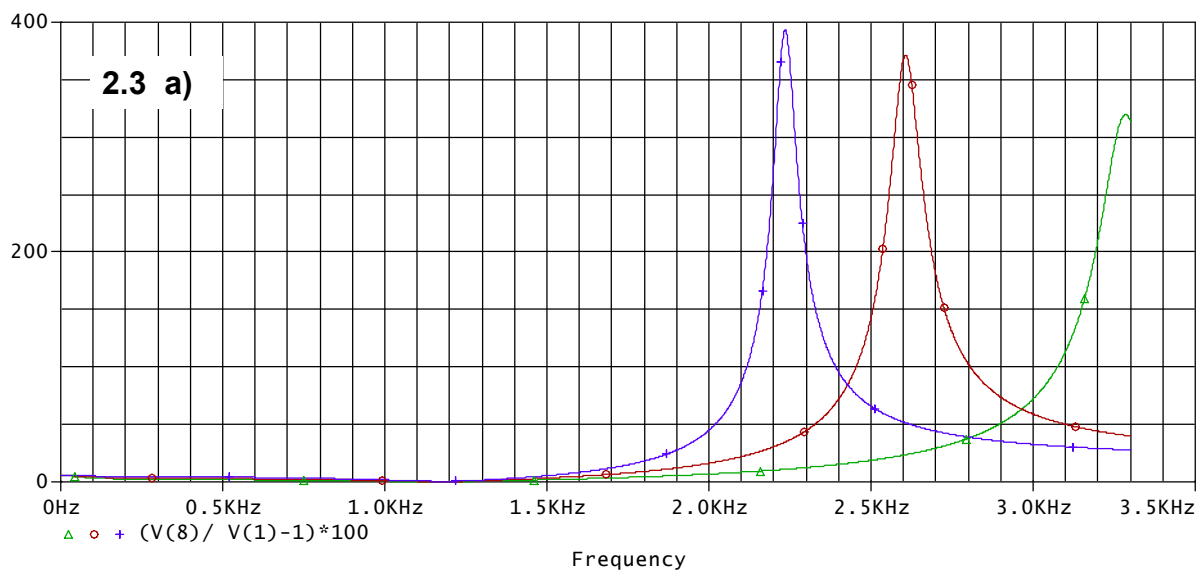
- statický elektroměr KWZ, proměnná  $C_{př. \text{ kabeláže}}$  - chyba převodu
- statický elektroměr KWZ, proměnná  $C_{př. \text{ kabeláže}}$  - chyba úhlu
- statický elektroměr ZMD, proměnná  $C_{př. \text{ kabeláže}}$  - chyba převodu
- statický elektroměr ZMD, proměnná  $C_{př. \text{ kabeláže}}$  - chyba úhlu

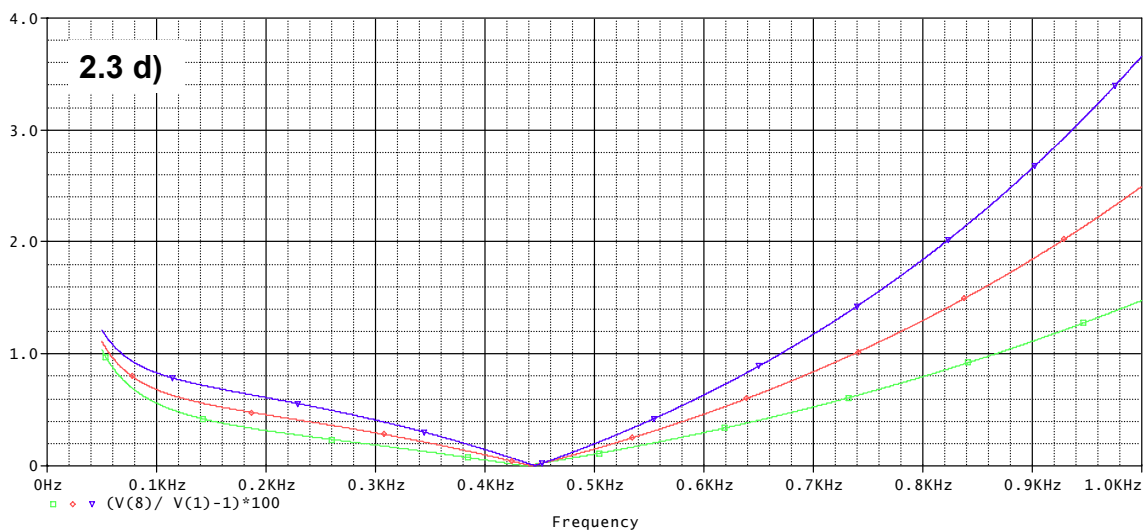
Z **obrázku 2.2** plyne, že přístrojový induktivní transformátor napětí s izolačním napětím 123 kV je vhodný k měření vyšších napětíových harmonických ve frekvenčním pásmu do 1,4 kHz. Ve frekvenčním pásmu od 1,4 kHz do 2 kHz je povolená mez chyby převodu a úhlu stanovená v normě [3] pro třídu přesnosti  $T_P = 0,2$  překročena. Maximum chyby převodu a úhlu nastává kolem 2,2 kHz, což již není ve sledovaném frekvenčním pásmu napětíových harmonických dodavatelem elektrické energie.

Z **obrázku 2.2** plyne, že proměnná kapacita kabeláže do hodnoty 1,5  $\mu\text{F}$  nemá vliv na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu (křivky se překrývají), stejně jako typ statického elektroměru. Obecně lze říci, že vnější břemeno přístrojového induktivního transformátoru napětí s izolačním napětím 123 kV má malý vliv na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu.

Aby dosažené výsledky byly platné obecně pro různé typy přístrojových induktivních transformátorů napětí s izolačním napětím 123 kV, jsou měněny hodnoty všech prvků náhradního schématu na **obrázku 2.3** v rozmezí  $\pm 40\%$  svých hodnot.

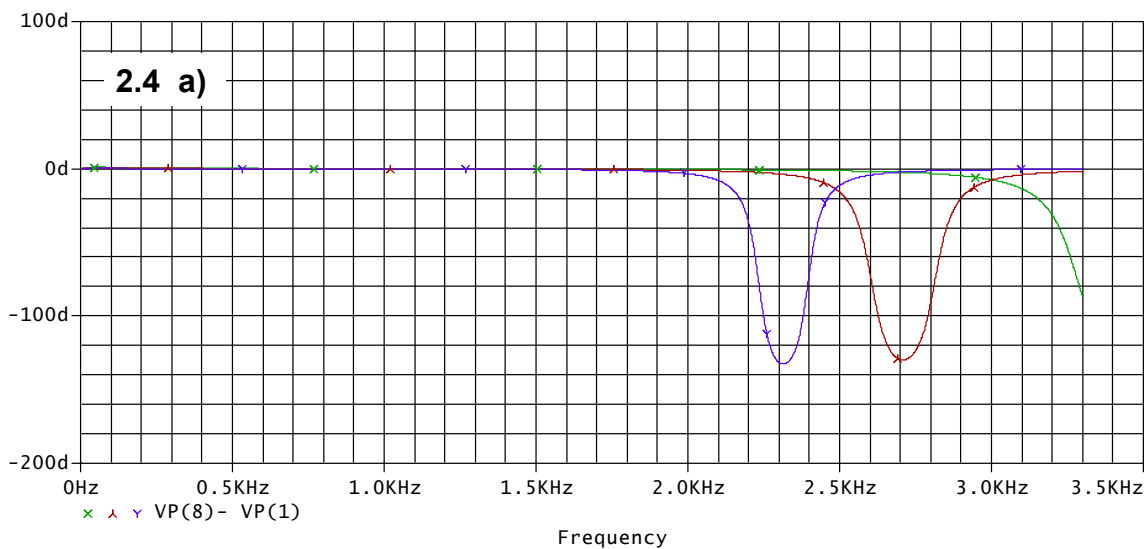
Na **obrázku 2.3 a 2.4** je červeným průběhem zobrazena frekvenční závislost chyby převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí, modrým průběhem vliv změny hodnoty  $L_P + 40\%$  na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu a zeleným průběhem vliv změny hodnoty  $L_P - 40\%$  na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu.

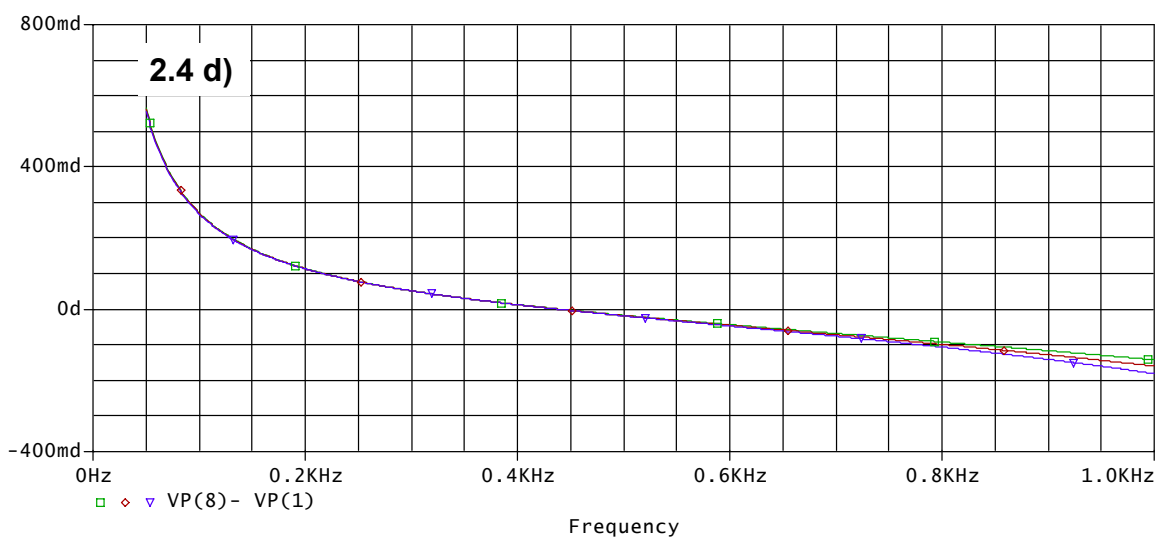
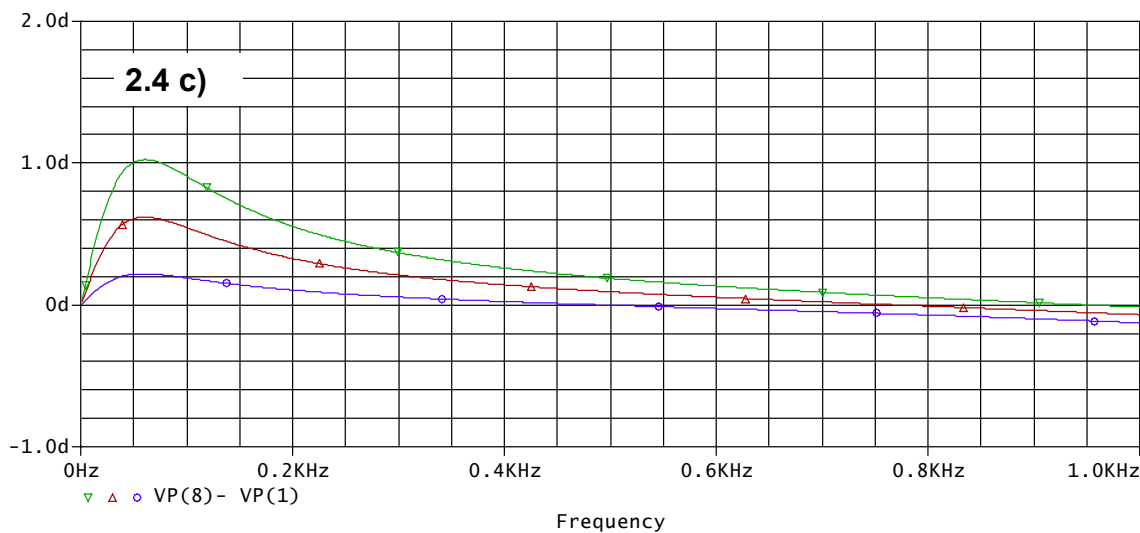
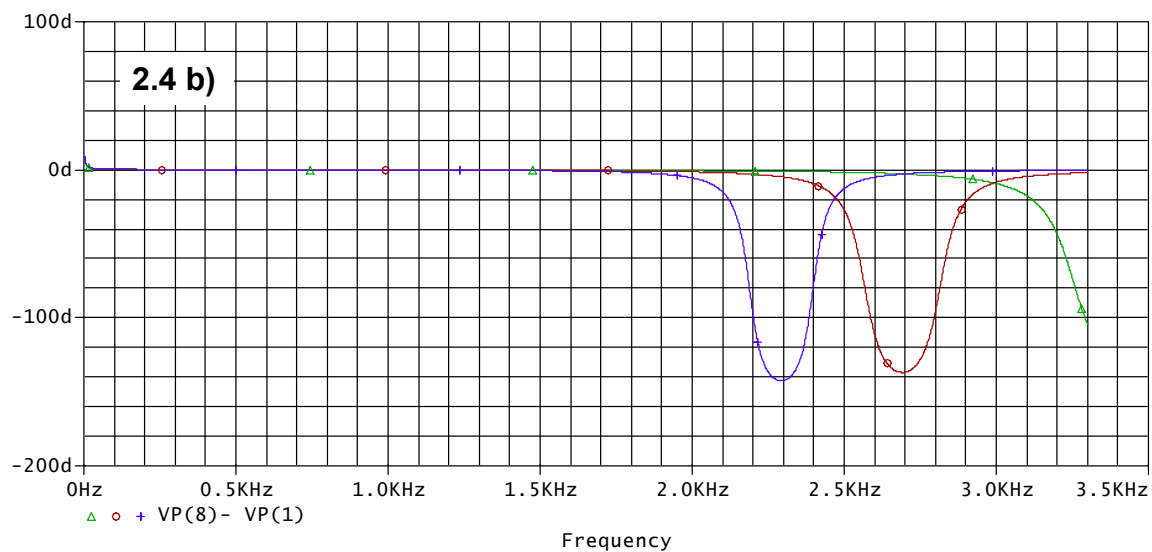




**Obrázek 2.3** - Vliv změny hodnoty  $L_P \pm 40\%$  na změnu frekvenční závislosti chyby převodu přístrojového induktivního transformátoru napětí

- a)  $L_E, R_E$  frekvenčně nezávislé
- b)  $L_E, R_E$  frekvenčně závislé
- c)  $L_E, R_E$  frekv. nezávislé, detail
- d)  $L_E, R_E$  frekv. závislé, detail





**Obrázek 2.4** - Vliv změny hodnoty  $L_P \pm 40\%$  na změnu frekvenční závislosti chyby úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí

- a)  $L_E, R_E$  frekvenčně nezávislé    b)  $L_E, R_E$  frekvenčně závislé  
 c)  $L_E, R_E$  frekv. nezávislé, detail    d)  $L_E, R_E$  frekv. závislé, detail

Z **obrázku 2.3** a **2.4** je zřejmé, že ve frekvenčním pásmu 0 – 5 kHz se zvyšující se hodnotou  $L_P$ , se zvyšuje maximum amplitudy chyby převodu, a úhlu, které se navíc posouvá směrem k nižším frekvencím. Dále je z **obrázku 2.3** a **2.4** zřejmé, že ve frekvenčním pásmu do 5 kHz nelze zanedbat frekvenční závislost prvků magnetizační větve.

Změna hodnot dalších prvků náhradního schématu na **obrázku 2.1** se projeví na změnu frekvenční závislosti takto:

- $R_P$  - ve frekvenčním pásmu 0 až 1 kHz se zvyšující se hodnotou  $R_P$  roste maximum amplitudy chyby převodu a úhlu, ve frekvenčním pásmu 1 - 5 kHz se zvyšující se hodnotou  $R_P$  klesá maximum amplitudy chyby převodu a úhlu.
- $L_{S1}, L_{S2}$  - ve frekvenčním pásmu 0 - 5 kHz se snižující se hodnotou  $L_{S1}, L_{S2}$  se zvyšuje maximum amplitudy chyby převodu a úhlu, které se navíc posouvá směrem k vyšším frekvencím.
- $C_{PS1}, C_{PS2}$  - ve frekvenčním pásmu 0 – 5 kHz se snižující se hodnotou  $C_{PS1}, C_{PS2}$  stoupá maximum amplitudy chyby převodu a úhlu, které se navíc posouvá směrem k vyšším frekvencím.
- $C_{PB}, C_{S1B}, C_{S2B}, C_{S1S2}, R_{S1}, R_{S2}, R_E$  - ve frekvenčním pásmu 0 – 5 kHz nemá změna těchto hodnot vliv na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu.

Z **obrázku 2.3** a **2.4** je zřejmé, že změna hodnot prvků náhradního schématu může výrazně ovlivnit změnu frekvenční závislosti přístrojového indukčního transformátoru napětí.

### 3 Závěr

Aby byly dodrženy meze chyby převodu a úhlu stanovené pro danou třídu přesnosti přístrojových transformátorů v normách [2, 3, 4] je nutné omezit frekvenční pásma, v jakých je možné považovat měření napěťových popř. proudových harmonických přístrojovými transformátory za vyhovující takto:

- 50 Hz - 5 kHz, přístrojový indukční transformátor proudu
- 50 Hz - 1,4 kHz, přístrojový indukční transformátor napětí
- 50-(53-100) Hz, přístrojový kapacitní transformátor napětí

Přičemž u přístrojového indukčního transformátoru napětí je nutné vždy pro daný typ simulací prověřit vliv konkrétních hodnot prvků  $L_P, R_P, C_{PS1}, C_{PS2}$  a  $L_{S1}, L_{S2}$  na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu.

## Literatura

- [1] ČSN EN 50 160 ed.2. Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě. ÚNMZ, 2008. 20s. Třídící znak 33 0122
- [2] ČSN EN 60 044-1. *Přístrojové transformátory – část 1: Transformátory proudu*. ÚNMZ, 2001. 44s. Třídící znak 35 1358.
- [3] ČSN EN 60 044-2. *Přístrojové transformátory – část 2: Induktivní transformátory napětí*. ÚNMZ, 2001. 44s. Třídící znak 35 1358.
- [4] ČSN EN 60 044-5. *Přístrojové transformátory – část 5: Kapacitní transformátory napětí*. ÚNMZ, 2005. 68s. Třídící znak 351358.
- [5] DOUGLASS, D.A. *Potential transformers accuracy at 60Hz voltage above and below rating and at frequencies above 60Hz*. USA: IEE Transactions, 1981. Vol. PAS-100. No.3. 1300-1375s.
- [6] ELHAFFAR, Abdelsalam - LEHTONEN, Matti. *High frequency current modeling for traveling waves detection*. USA: IEEE, 2007. 6s. ISSN 1-4244-1298-6.
- [7] IMRIŠ, Peter - LEHTONEN, Matti. *Modelling of a voltage transformer for transients*. USA: IEEE Xplore, 2009. 5s.
- [8] SEL. *Power system instrument transformers*. Schweizer engineering laboratories, 2005. 82s.
- [9] TZIOUVARAS, D. et al. Mathematical model for current, voltage, and coupling capacitor voltage transformers. *IEEE Transactions*, 2000. Vol.15. No.1. 62-72s. ISSN 0885-8977.
- [10] HLAVA, K. *Optimalizace přenosu energie v elektrické trakci*. VÚŽ Praha, 1986. 75s.
- [11] VYDRŽAL, T. *Měření harmonických v sítích vn a vvn*. Pardubice: UP a DFJP. 2008. 60s. Diplomová práce na DFJP, katedře elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě. Vedoucí diplomové práce HLAVA, K.

Praha, březen 2010

Lektoroval: Doc. Ing. Karel Hlava, CSc.

DFJP, UP