

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

**KATEDRA ELEKTROTECHNIKY, ELEKTRONIKY
A ZABEZPEČOVACÍ TECHNIKY V DOPRAVĚ**

**MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH VELIČIN PŘI
NESINUSOVÝCH PRŮBĚZÍCH NAPĚTÍ A PROUDU**

DISERTAČNÍ PRÁCE

AUTOR: Ing. Michal Satori
VEDOUCÍ PRÁCE: Doc. Ing. Karel Hlava, CSc.

2009

Prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci se vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 04. 01. 2010

Ing. Michal Satori

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval zejména panu doc.Ing.Karlu Hlavovi, CSc. za poskytnutí technické literatury, odborné vedení a zejména cenné rady při zpracování disertační práce.

Dále bych chtěl poděkovat paní Lence Murkové z Meziknihovni výpůjční služby Univerzitní knihovny Pardubice za ochotu a rychlost při zajišťování zahraničních článků k danému tématu.

V Pardubicích dne 04. 01. 2010

Ing. Michal Satori

ANOTACE

Distributor elektrické energie osazuje v trakčních napájecích stanicích 25kV, 50Hz SŽDC, s.o. statické elektroměry, které přenášejí data o spotřebě elektrické energie nepřetržitě na dispečink distributora elektrické energie pomocí GPRS. Měřicím vstupem přesných fakturačních statických elektroměrů jsou přístrojové měřicí transformátory induktivního typu s izolačním napětím 123kV umístěné v rozvodně 110kV trakční napájecí stanice SŽDC, s.o.

Z naměřených hodnot distributor elektrické energie vyhodnocuje odebraný činný výkon, jalový výkon, účinník, dodržování čtvrt hodinového sjednaného maxima a také dodržování maximálních povolených mezí napěťových popř. proudových harmonických.

Maximální procentní poměr jednotlivých řádů napěťových popř. proudových harmonických v přípojovacím bodě, stanoví distributor elektrické energie podle zkratového výkonu v přípojovacím bodě a dodržování těchto mezí je zesmluvněno s odběratelem v přípojovacích podmínkách. Je zřejmé, že v místě připojení trakční napájecí stanice s malým zkratovým výkonem může být technicky náročné zajistit splnění těchto povolených mezí.

Cílem této práce je posoudit chybu převodu a úhlu přístrojových transformátorů s izolačním napětím 123kV v rozvodně 110kV trakční napájecí stanice 25kV, 50Hz při nesinusových průbězích napětí a proudu, tedy poznat jejich frekvenční závislost chyby převodu a úhlu.

Statický elektroměr pro fakturační měření obsahuje procesorovou jednotku, která zajišťuje vzorkování vstupního analogového signálu napětí, proudu a následně vzorky matematicky vyhodnocuje. Vzorkování i matematické operace probíhají na základní a vyšších harmonických. Bude zkoumán vliv statického elektroměru a přívodní kabeláže na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu přístrojového transformátoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Přístrojový transformátor, přístrojový transformátor proudu, přístrojový induktivní transformátor napětí, přístrojový kapacitní transformátor napětí, přístrojový měřicí transformátor, přístrojový jistící transformátor, chyba převodu, chyba úhlu, frekvenční odezva, základní harmonická, vyšší harmonické

TITTLE

Measurement of electric values by non-sinusoidal voltage and current waveforms

ANNOTATION

Distributor of electric power fitted in substations 25kV, 50Hz SŽDC static electric meters, which transmit data on the consumption of electric energy continuously for dispatching distributor of electric energy using GPRS. Precision measuring input of billing meters are still instrument measuring transformers of inductive type with insulating voltage 123kV located in distribution plant 110kV substations 25kV, 50Hz SŽDC.

From the measured values of electric energy distributor evaluate active power, reactive power, power factor, compliance with the agreed maximum quarter-hour, and compliance with the maximum permissible limits of voltage or current harmonics.

Maximum percentage of individual orders of voltage or current harmonics in the connection point, the distributor of electric energy sets down under short-circuit power in the connection point and compliance with these limits. It is clear that the connection point of substations with low short-circuit power can be technically challenging to ensure compliance with the permitted limits.

The aim of this work is to assess the vulnerability of the transfer and the angle error of instrument transformers with insulating voltage 123kV in distribution plant 110kV substations 25kV, 50Hz SŽDC at non-sinusoidal voltage and current waveforms, therefore to know their frequency dependent transfer and angle error.

Static meters for billing processing unit includes a processor unit that ensures sampling input analog voltage, current signal and then mathematically evaluate samples. Sampling and mathematical operations are performed on the basic and higher harmonics. It will be examined the influence of the static meter and incoming cabling on frequency dependent transfer and angle error of instrument transformer.

KEYWORDS

Instrument transformer, instrument current transformer, instrument inductive voltage transformer, instrument capacitive voltage transformer, transfer error, angle error, frequency response, the fundamental harmonic, higher harmonics.

OBSAH

1. Pozice SŽE a požadavky distributora elektrické energie	10
1.1. Pozice SŽE	10
1.1.1. SŽE v roli distributora elektrické energie	10
1.1.2. SŽE v roli odběratele elektrické energie	11
1.2. Požadavky distributora elektrické energie	12
1.2.1. Přístrojové transformátory	12
1.2.2. Připojovací odmínky	13
2. Trakční napájecí stanice jednofázové trakční soustavy 25kV, 50Hz	15
2.1. Účel trakční napájecí stanice 25kV, 50Hz	15
2.2. Jednopolové schéma TNS 25kV, 50Hz	16
2.3. Trakční transformátor 110/25kV, 50Hz	17
2.3.1. Schéma připojení TNS 25kV, 50Hz k trakčnímu vedení - zapojení do T	18
2.3.2. Schéma připojení TNS 25kV, 50Hz k trakčnímu vedení - zapojení do L	18
2.4. FKZ v TNS 25kV, 50Hz	19
2.4.1. Důvody doplnění FKZ do TNS 25kV, 50Hz	19
2.4.2. Funkce FKZ v TNS 25kV, 50Hz	19
2.4.3. FKZ dnešní koncepce	20
3. Chyba převodu a úhlu přístrojových transformátorů v rozvodně 110kV TNS 25kV, 50Hz při sinusovém průběhu napětí a proudu	21
3.1. Provedení přístrojových transformátorů	21
3.1.1. Provedení přístrojových transformátorů proudu	21
3.1.1.1. Feromagnetický obvod přístrojového transformátoru proudu	21
3.1.1.2. Uspořádání přístrojového transformátoru proudu	23
3.1.2. Provedení přístrojového indukčního transformátoru napětí	25
3.1.2.1. Feromagnetický obvod přístrojového indukčního transf. napětí	25
3.1.2.2. Uspořádání přístrojového indukčního transformátoru napětí	26
3.1.3. Provedení přístrojového kapacitního transformátoru napětí	28
3.1.3.1. Feromagnetický obvod přístrojového kapacitního transf. napětí	28
3.1.3.2. Uspořádání přístrojového kapacitního transformátoru napětí	28
3.2. Náhradní schéma přístrojového transformátoru	30
3.2.1. Náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu a indukčního transformátoru napětí platné v okolí jmenovité frekvence	30
3.2.2. Náhradní schéma přístrojového kapacitního transformátoru napětí	33
3.3. Princip přístrojového transformátoru proudu	34
3.3.1. Charakteristika funkce	34
3.3.2. Závislost chyby převodu a úhlu na primárním proudu, vnějším břemeni, sekundárním účinníku a kolísání jmenovité frekvence	39

3.3.2.1.	Závislost chyby převodu a úhlu na primárním proudu	39
3.3.2.2.	Závislost chyby převodu a úhlu na vnějším břemeni	40
3.3.2.3.	Závislost chyby převodu a úhlu na účinníku vnějšího břemene	40
3.3.2.4.	Závislost chyby převodu a úhlu na kolísání jmenovité frekvence	40
3.3.3.	Přesnost v provozní a nadproudové oblasti	41
3.3.3.1.	Přesnost v provozní oblasti	41
3.3.3.2.	Přesnost v nadproudové oblasti	43
3.4.	Princip přístrojového induktivního transformátoru napětí	48
3.4.1.	Charakteristika funkce	48
3.4.2.	Závislost chyb převodu a úhlu na vnějším břemeni, primárním napětí, sekundárním účinníku a kolísání jmenovité frekvence	51
3.4.2.1.	Závislost chyby převodu a úhlu na vnějším břemeni	51
3.4.2.2.	Závislost chyby převodu a úhlu na primárním napětí	51
3.4.2.3.	Závislost chyby převodu a úhlu na sekundárním účinníku	51
3.4.2.4.	Závislost chyby převodu a úhlu na kolísání jmenovité frekvence	51
3.4.3.	Přesnost	52
3.4.3.1.	Přesnost přístrojových induktivních měřících transformátorů napětí	52
3.4.3.2.	Přesnost přístrojových induktivních jistících transformátorů napětí	52
3.5.	Princip přístrojového kapacitního transformátoru napětí	53
3.5.1.	Charakteristika funkce	53
3.5.2.	Závislost chyby převodu a úhlu na teplotním činiteli, vnějším břemeni, kolísání jmenovité frekvence a zadržování náboje	57
3.5.2.1.	Závislost chyby převodu a úhlu na teplotním činiteli	57
3.5.2.2.	Závislost chyby převodu a úhlu na vnějším břemeni	57
3.5.2.3.	Závislost chyby převodu a úhlu na kolísání jmenovité frekvence	57
3.5.2.4.	Závislost chyby převodu a úhlu na zadržování náboje	58
3.5.3.	Odezva při přepětí	58
3.5.4.	Přesnost	59
3.5.4.1.	Přesnost přístrojových kapacitních měřících transformátorů napětí	59
3.5.4.2.	Přesnost přístrojových kapacitních jistících transformátorů napětí	60
4.	Frekvenční závislost chyby převodu a úhlu přístrojových transformátorů v rozvodně 110kV TNS 25kV, 50Hz	61
4.1.	Přístrojové transformátory obecně	61
4.2.	Vnější břemeno přístrojového transformátoru	64
4.3.	Přístrojový transformátor proudu	65
4.3.1.	Náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu	65
4.3.2.	Výzkum vlivu prvků náhradního schématu přístrojového transformátoru proudu na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu	68
4.3.2.1.	Vliv prvků $R_{e,f}$, $L_{e,f}$ na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu	68

4.3.2.2.	Vliv kapacity mezi vinutími a kapacit proti zemi Cs1s2, Cs1b a Cs2b na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu	70
4.3.2.3.	Vliv vnější zátěže na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu	70
4.3.3.	Frekvenční závislost chyby převodu a úhlu	70
4.3.4.	Závěr	71
4.4.	Přístrojový induktivní transformátor napětí	72
4.4.1.	Náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí	72
4.4.2.	Postup měření hodnot prvků náhradního schématu	74
4.4.2.1.	Postup měření hodnot prvků Rp, Lp, Rs, Le, Re	74
4.4.2.2.	Postup měření a odvození hodnot kapacit Cpb, Cps1, Cps2, Cs1b, Cs2b, Cs1s2	75
4.4.3.	Frekvenční závislost chyby převodu a úhlu	78
4.4.4.	Závěr	81
4.5.	Přístrojový kapacitní transformátor napětí	81
4.5.1.	Náhradní schéma přístrojového kapacitního transformátoru napětí	81
4.5.2.	Frekvenční závislost chyby převodu a úhlu	82
4.5.3.	Výzkum vlivu jednotlivých prvků náhradního obvodu na chybu převodu a úhlu	83
4.5.4.	Závěr	84
5.	Simulace frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojového induktivního transf. napětí v rozvodně 110kV, TNS 25kV, 50Hz	84
5.1.	Náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí	84
5.2.	Hodnoty prvků náhradního schématu	85
5.3.	Kontrola hodnot kapacit mezi vinutími a mezi vinutími a kostrou	87
5.4.	Výzkum vlivu hodnot prvků náhradního schématu na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu	88
5.4.1.	Vliv změny hodnoty prvku Lp na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu	88
5.4.2.	Vliv změny hodnoty prvku Rp na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu	92
5.4.3.	Vliv změny hodnoty prvku Rs1 (Rs2) na fr. závislost chyby převodu a úhlu	92
5.4.4.	Vliv změny hodnoty prvku Ls1 (Ls2) na fr. závislost chyby převodu a úhlu	93
5.4.5.	Vliv změny hodnoty prvku Cpb na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu	96
5.4.6.	Vliv změny hodnoty prvku Cps1 (Cps2) na fr. závislost chyby převodu a úhlu	96
5.4.7.	Vliv změny hodnoty prvku Cs1s2 na fr. závislost chyby převodu a úhlu	99
5.5.	Vliv reálného břemene na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu	99
5.6.	Frekvenční závislost chyby převodu a úhlu EMFC145	101
6.	Závěry a doporučení	104
7.	Použité zkratky	107
8.	Seznam obrázků	107
9.	Seznam tabulek	113

10. Seznam příloh		113
11. Literatura		113
Přílohy k disertační práci		116
Příloha P-1	Ověření správnosti určení hodnot kapacit spořítaných z <i>tabulky 4.4</i> Gauss-Seidelovou metodou z hodnot kapacit měřených	117
Příloha P-2	Výzkum změny hodnot prvků náhradního schématu na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu	119

1. Pozice SŽE a požadavky distributora elektrické energie

1.1. Pozice SŽE

Správa železniční energetiky, s.o. (dále jen SŽE) jako organizační jednotka Českých drah, s.o. (dále jen ČD) přešla v roce 2008 do působnosti Správy železniční dopravní cesty, s.o. (dále jen SŽDC). Cílem bylo zajistit odběratelům drážní elektrické energie rovné podmínky přístupu k dodávce elektrické energie při stejných připojovacích podmínkách a stejných cenách za přenos a dodávku elektrické energie. Jelikož je ve vlastnictví SŽDC trakční vedení, transformační stanice a místní distribuční soustava, účtuje SŽE odběratelům jako jednotka SŽDC nejen cenu za odběr, ale i přenos elektrické energie. SŽE tak má možnost zahrnout do ceny veškeré náklady spjaté s dodávkou a přenosem elektrické energie.

1.1.1. SŽE v roli distributora elektrické energie

SŽE zajišťuje zejména napájení trakčních napájecích stanic SŽDC, a to jak na jednofázové trakční soustavě 25kV, 50Hz, tak jednosměrné trakční soustavě 3kV DC z distribuční rozvodné soustavy (většinou napěťová hladina 110kV, výjimečně 22kV) distributora elektrické energie.

V těchto trakčních napájecích stanicích má SŽE osazeno fakturační měření v podobě statických elektroměrů, které předávají data pomocí GPRS on-line do řídicího centra SŽE. Vstupní veličiny napětí a proudu získávají statické elektroměry ze sekundárních svorek přístrojových transformátorů s izolačním napětím 123kV, které jsou umístěny v rozvodně 110kV. Z přenášených dat SŽE vyhodnocuje spotřebu činného a jalového výkonu, účinník, čtvrt hodinové sjednané maximum a úroveň harmonických v připojovacím bodě trakční napájecí stanice.

Z trakčních napájecích stanic SŽDC je napájeno zejména trakční vedení a další odběry jako vlastní spotřeba napájecí stanice, kabelový rozvod pro napájení zabezpečovacího zařízení. Z trakčního vedení jsou napájeny zejména elektrická hnací vozidla a další odběry jako elektrický ohřev výhybek, zabezpečovací zařízení.

Nejvýznamnějším odběratelem elektrické energie z trakčního vedení a rozvodů SŽDC jsou operátoři vlakové dopravy ČD a ČD Cargo, kteří odebírají elektrickou energii na základě smlouvy. Na trhu se uplatňují ale i další operátoři, zejména v oblasti nákladní dopravy. Odběr z napájecí stanice musí být tedy fakturován mezi několik operátorů vlakové dopravy. SŽDC je často vlastníkem rozvodů 22kV/0,4kV ze kterých jsou napájena vlaková nádraží, které jsou ve

vlastnictví ČD. Tyto odběry jsou taktéž osazeny cejchovaným elektroměrem a s odběrateli jsou uzavřeny smlouvy o odběru.

Aby SŽE mohla vystupovat v roli distributora elektrické energie, musí vlastnit podle podmínek Energetického regulačního úřadu (dále jen ERU) licenci na obchod s elektrickou energií.

Cenu za dodávku elektrické energie a její přenos stanovuje SŽE.

1.1.2. SŽE v roli odběratele elektrické energie

SŽE zajišťuje nákup elektrické energie pro trakční napájecí stanice a další drážní odběry. Na základě žádosti SŽE se odběr trakčních napájecích stanic sčítá a z tohoto důvodu se SŽE stalo v roce 2004 oprávněným zákazníkem. Hlavní výhodou tohoto bylo, že SŽE jako oprávněný zákazník si může vybrat dodavatele elektrické energie a sčítáním odběrů jednotlivých trakčních napájecích stanic se eliminuje vysoké riziko překročení nasmlouvaného čtvrt hodinového maxima.

SŽE v roli odběratele musí splnit požadavky distributora elektrické energie stanovené v jeho přípojovacích podmínkách a musí co nejpřesněji predikovat svůj odběr. Jak distributor elektrické energie (ČEZ, E.ON, PRE), tak odběratel elektrické energie (SŽE) osazuje trakční napájecí stanice statickými fakturačními elektroměry s přenosem dat na dispečink pomocí GPRS. SŽE tak má zajištěnu nepřetržitou kontrolu zda nepřekračuje hodnoty povolené (účinník, harmonické) nebo nasmlouvané (čtvrt hodinové maximum).

Měřicím vstupem přesných fakturačních statických elektroměrů distributora i odběratele jsou přístrojové měřicí transformátory induktivního typu s izolačním napětím 123kV v rozvodně 110kV, které měří při nesinusových průbězích napětí a proudu se zvýšenou chybou převodu i fáze.

Stávající elektrická hnací vozidla používaná na stejnosměrné trakční soustavě 3kV DC řídí trakční výkon buď použitím rozjezdových odporů a přepínáním řazení sériových motorů nebo pulzním měničem. Nicméně trakční napájecí stanice stejnosměrné trakční soustavy 3kV DC se jeví z pohledu přenosu vyšších harmonických do distribuční rozvodné soustavy jako méně problematická. To je zejména díky použití dvanáctipulzních trakčních usměrňovačů, v jejichž napájecím proudu není obsažena složka 5. a 7. harmonické, přičemž složka 11. a 13. harmonické splňuje meze stanovené v přípojovacích podmínkách distributora elektrické energie.

Elektrická hnací vozidla používaná na jednofázové trakční soustavě 25kV, 50Hz používají pro regulaci trakčního výkonu odbočkovou regulaci, neřízený diodový usměrňovač a sériové stejnosměrné trakční motory zapojené paralelně. Tato hnací vozidla mají nevyhovující

účinník (cca 0,84 [1]) a produkují vyšší harmonické (zejména 3. a 5.), které jsou přenášeny do distribuční rozvodné soustavy 110kV. Za účelem zlepšení účinníku odběru těchto elektrických hnacích vozidel a omezení přenosu vyšších harmonických do distribuční rozvodné soustavy 110kV se do trakčních napájecích stanic jednofázové trakční soustavy 25kV, 50Hz musí instalovat filtračně kompenzační zařízení (dále jen FKZ).

SŽE jako hlavní dodavatel elektrické energie vlakovým operátorům však zatím nemá možnost podmínky vyplývající z připojovacích podmínek mezi SŽE a ČEZ (E.ON, PRE) přenést na vlakové operátory. Vzhledem ke stáří elektrických hnacích jednotek vlakových operátorů by bylo přenesení těchto požadavků na vlakové operátory neřešitelný problém. Proto SŽE zabezpečuje na své náklady osazení trakčních napájecích stanic jednofázové trakční soustavy 25kV, 50Hz FKZ.

Cena za dodávku a přenos elektrické energie SŽE stanovuje ERÚ.

1.2. Požadavky distributora elektrické energie

1.2.1. Přístrojové transformátory

Přístrojové transformátory musí splňovat podmínky těchto norem:

- ČSN EN 60044-1 Přístrojové transformátory – část 1: Transformátory proudu,
- ČSN EN 60044-2 Přístrojové transformátory – část 2 : Transformátory napětí,
- ČSN EN 60044-3 Přístrojové transformátory – část 3: Kombinované transformátory,
- ČSN EN 60044-5 Přístrojové transformátory – část 5: Kapacitní transformátory napětí.

Přístrojové transformátory s izolačním napětím 123kV, jak proudové tak napěťové, mají většinou dvě a více sekundárních vinutí. Sekundární vinutí pro jištění má menší přesnost v okolí jmenovitého proudu (napětí), ale vyhovující přesnost při zkratu pro potřeby jištění. Sekundární vinutí určené pro spojení s fakturačním elektroměrem je zpravidla zaplombované a má vysokou přesnost při jmenovitém primárním proudu (napětí), ale nízkou přesnost při nadproudech a přepětích. Jelikož sekundární zaplombované vinutí přístrojového transformátoru slouží jako vstup pro fakturační měření, je přístrojový transformátor „měřidlem stanoveným“. Stanovená měřidla podléhají zákonu č.505/1990Sb (Zákon o metrologii). Tato měřidla musejí být schválená:

- Schvalování typů

Platí vždy pro jeden vzorek z dané typové série. Schválení typu provádí Český metrologický institut nebo lze již vykonanou zkoušku uznat, pokud je výrobek z EU případně z jiného státu, s nímž je sjednána mezinárodní smlouva o uznávání zkoušek.

➤ **Ověřování přístrojových transformátorů**

Před uvedením do provozu musí být přístroje ověřeny. Ověření vykonávají metrologické orgány.

a musí splňovat předepsané minimální třídy přesnosti:

- měřící místo o napětí od 1kV do 52kV – třída přesnosti 0,5
- měřící místo o napětí vyšším než 52kV – třída přesnosti 0,2.

Určitou odlišností přístrojových transformátorů jako stanovených měřidel je, že výrobcem udaná přesnost platí v mezích udaných normou.

1.2.2. Připojovací podmínky

Distributor elektrické energie monitoruje zpětné vlivy odběrů na distribuční rozvodnou soustavu 110kV. Podkladem pro takovéto posouzení byla nejdříve zahraniční norma [2] a později norma [3], která zkoumá zátěž a její zpětný vliv na distribuční rozvodnou soustavu.

Distributor elektrické energie musí garantovat odběratelům elektrické energie dodávku elektrické energie s parametry, které jsou v souladu s normou [3]. Aby tyto parametry mohl distributor elektrické energie splnit, stanovuje pro střední a velké odběry tzv. připojovací podmínky. Povinnosti odběratele je tyto podmínky splnit při využití všech technicky dostupných opatření.

Jelikož v ČR působí 3 významní distributoři elektrické energie (ČEZ, E.ON, PRE) liší se jejich požadavky na omezení zpětných vlivů odběru, které jsou stanovené v připojovacích podmínkách. Odběr je navíc čím dále více deformován vyššími harmonickými, a to i v případě odběru domácností, proto se i požadavky dodavatele elektrické energie zpříšňují. Níže jsou uvedeny požadavky maximálních přípustných vlivů na distribuční rozvodnou soustavu 110kV distributora elektrické energie pro trakční napájecí stanici Veselí nad Lužnicí jednofázové trakční soustavy 25kV, 50Hz.

Požadavek distributora elektrické energie – rok 2008 [4]

- Účinník odběru ($\cos \varphi_1$) 0,95 – 1

$$\cos \varphi_1 = \text{DPF} = \frac{P}{S} \quad [-] \quad (2.1)$$

kde: $\cos \varphi_1$, DPF účinník základní harmonické [-]
 P celkový činný výkon na základní harmonické [W]
 Q celkový jalový výkon na základní harmonické [VAr]

- Maximální meze vyšších napěťových harmonických

Řád harmonické v	Maximální přípustná hodnota u_v pro rezervovaný příkon S_0 (%)
3	0,4
5	0,2
7	0,4
9	0,3
11	0,3
13	0,2

- Nesymetrie napětí způsobená jedním odběratelem musí být nejvýše rovna 0,7%.
- Minimální impedance trakční napájecí stanice na frekvenci HDO 216,7Hz musí být větší než 1288Ω.

Jelikož se, ale výstavba opozdila a realizace byla uskutečněna v roce 2009, změnil se požadavek distributora elektrické energie v připojovacích podmínkách takto:

Požadavek distributora elektrické energie – rok 2009 [4]

- Účinník odběru ($\cos \varphi_1$) 0,95 – 1
- Místo původně uplatňovaných omezení vyšších napěťových harmonických uvedených ve výše uvedené tabulce byly stanoveny maximální přípustné úrovně jednotlivých vyšších harmonických proudů na hladině 110 kV podle této tabulky:

řád harmonické	přípustná úroveň proudové harmonické [A]
3	3,72
5	9,299
7	6,199
11	3,1
13	2,48
17	1,24
19	0,93
větší než 19	0,62
THD [%]	nejvýše 13,123

kde: THD je celkové harmonické zkreslení [3]

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{v=2}^{40} \left(\frac{Q_v}{Q_1}\right)^2} \quad [-] \quad (2.2)$$

kde: Q představuje buď proud, nebo napětí

Q_1 efektivní hodnota základní harmonické složky proudu, nebo napětí

v řád harmonické

Q_v efektivní hodnota napěťové (proudové) harmonické složky řádu v

- Původní požadavek na dodržení nesymetrie napětí menší než 0,7 % byl následně změněn na mezní hodnotu 1,5 %.
- Pro místo připojení trakční napájecí stanice Veselí nad Lužnicí se požaduje, aby rušivé napětí na frekvenci HDO, nebo v bezprostřední blízkosti, nepřekročilo 0,1 % U_n , na frekvenci $f_{\text{HDO}} \pm 100$ Hz pak hodnotu 0,3 % U_n .

2. Trakční napájecí stanice jednofázové trakční soustavy 25kV, 50Hz

2.1. Účel trakční napájecí stanice jednofázové trakční soustavy 25kV, 50Hz

Trakční napájecí stanice jednofázové trakční soustavy 25 kV, 50 Hz (dále jen TNS 25kV, 50Hz) zabezpečuje spolehlivé napájení trakčního vedení (dále jen TV) jednofázové trakční soustavy 25 kV, 50 Hz. Hlavní částí TNS 25 kV, 50 Hz jsou rozvodny 110kV a 25kV, které spojují třífázovou distribuční soustavu 110kV,50Hz s jednofázovou trakční soustavou 25kV, 50Hz. Nedochozí zde ke změně frekvence, ale pouze k transformaci jmenovitého napětí distribuční soustavy 110kV, 50Hz na jmenovité napětí jednofázové trakční soustavy 25kV, 50Hz. Důležitým úkolem je převést nesymetrický jednofázový trakční odběr do trojfázové distribuční soustavy 110 kV a dodržet dovolenou napěťovou nesymetrii. Za tímto účelem se používá trakčních transformátorů a jejich specifického zapojení umožňujícího částečně omezit napěťovou nesymetrii. Napájení jednofázové trakční proudové soustavy 25kV, 50Hz z trojfázové distribuční soustavy 110kV lze provést dvěma způsoby:

- dělením fází v každé TNS 25 kV, 50 Hz,
- vystřídáním připojení jednofázových TNS 25 kV, 50 Hz na jednotlivé fáze distribuční soustavy 110kV.

V každé TNS 25 kV, 50 Hz jsou osazeny dva olejové transformátory s typovým výkonem 12,5MVA, celkový nainstalovaný výkon je tedy 25 MVA.

Rozvodna 110kV je většinou venkovního provedení a je v uspořádání H. Vlastníkem rozvodny je obvykle SŽDC nebo výjimečně je vlastníkem vstupní části rozvodny 110kV TNS 25kV, 50Hz distributor elektrické energie. Manipulace s přívodními prvky musí být vždy prováděna zaměstnanci SŽDC s vědomím distributora elektrické energie, který vstupní část rozvodny používá pro přenos elektrické energie.

Nezávislé přívody z distribuční soustavy 110kV jsou tedy vždy dva. Každý přívod je osazen přístrojovými transformátory napětí a proudu s izolačním napětím 123kV. Rozvodna 110kV obsahuje kromě přístrojových transformátorů odpojovače, vypínače, svodiče přepětí a povětšinou dva jednofázové trakční transformátory zajišťující napájení rozvodny 25kV. Rozvodna 25kV je většinou vnitřního provedení a hlavní část tvoří vzduchem izolovaný kovově krytý rozváděč 25kV, 50Hz. Rozváděč je rozdělen do polí. Základní část rozváděče 25kV tvoří pole přívodní, které jsou osazeny ochranami přívodu, odpojovači a pole vývodová, která jsou osazena vakuovými vypínači a distančními ochranami. Pole přívodní i vývodové jsou osazeny přístrojovými transformátory pro informativní měření (monitoring spotřeby elektrické energie, jistění). Další část rozváděče 25kV, 50Hz tvoří pole vývodové pro FKZ a pole transformátoru vlastní spotřeby 25kV / 230V, 50Hz.

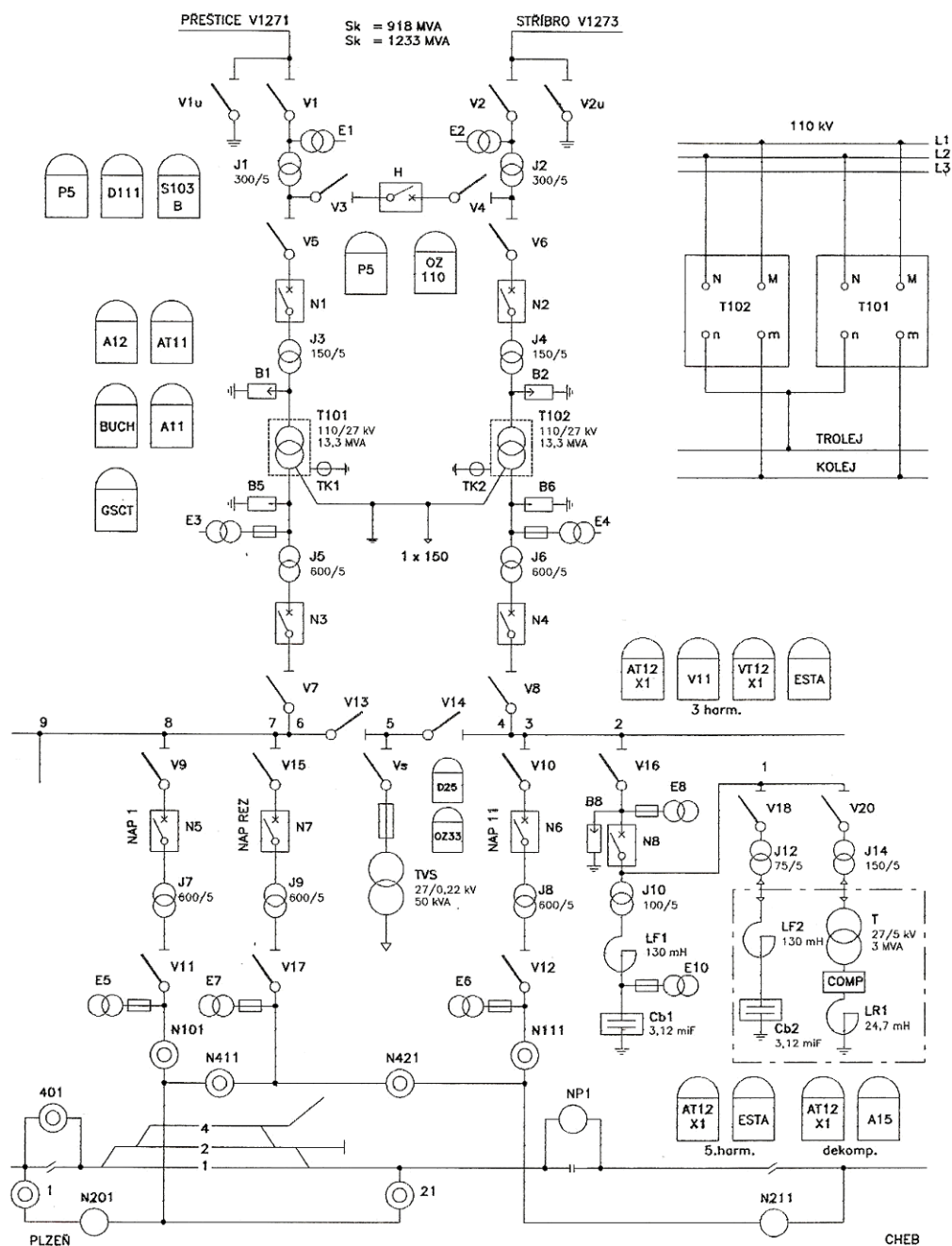
Ochrany rozvodny 110kV jsou většinou umístěny v samostatném domku měření a ochran v objektu rozvodny 110kV nebo jsou umístěny v budově rozvodny 25kV. Umístění fakturačních elektroměrů a ochran do domku v objektu rozvodny 110kV je výhodné zejména z hlediska zkrácení délky kabeláží.

2.2. Jednopolové schéma TNS 25kV, 50Hz

Na *obrázku 2.1* je příklad uspořádání TNS 25 kV, 50 Hz. Přístrojové transformátory proudu s izolačním napětím 123kV umístěné v rozvodně 110kV jsou ve schématu označeny J1 až J4 a přístrojové transformátory napětí s izolačním napětím 123kV umístěné v rozvodně 110kV jsou označeny ve schématu E1 až E2.

Přístrojové transformátory proudu s izolačním napětím 27,5kV umístěné v rozvodně 25kV jsou ve schématu označeny J5 až J14 a přístrojové transformátory napětí s izolačním napětím 27,5kV umístěné v rozvodně 25kV jsou ve schématu označeny E3-E10.

Kapacitní napěťové transformátory s izolačním napětím 123kV zatím nejsou v rozvodnách 110kV TNS 25kV, 50Hz nasazeny, ale snahu o jejich použití v rozvodnách 110kV nelze zcela vyloučit, protože část rozvodn 110kV TNS 25kV, 50Hz je ve vlastnictví distributora elektrické energie.



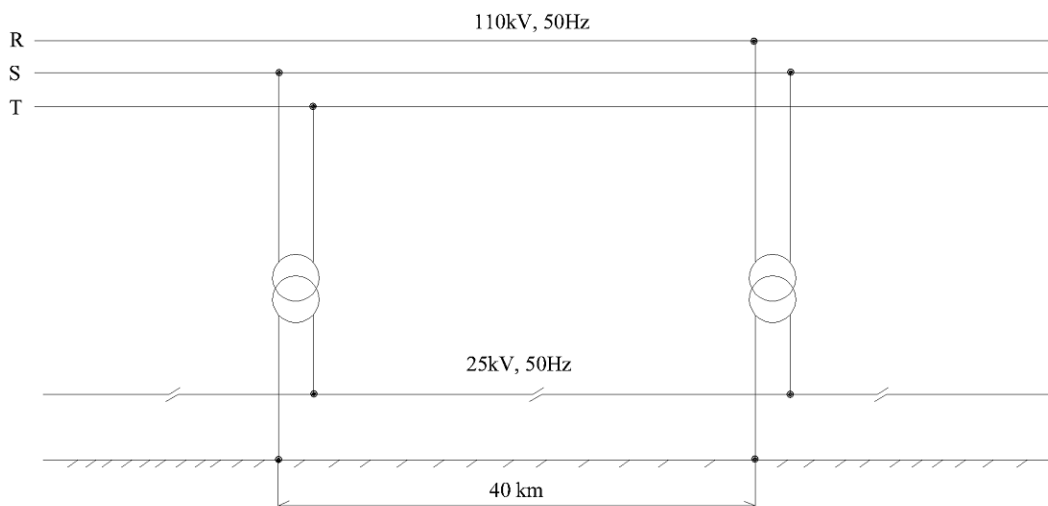
Obrázek 2.1 – Příklad uspořádání TNS 25 kV, 50 Hz - Vranov

2.3. Trakční transformátor 110/25kV, 50Hz

Trakční transformátor je jednofázový, olejový s přirozeným chlazením a s typovým výkonem 12,5MVA. Zajišťuje převod jmenovitého napětí distribuční soustavy 110kV, 50Hz na jmenovité napětí jednofázové trakční soustavy 25kV, 50Hz.

2.3.1. Schéma připojení TNS 25kV, 50Hz k trakčnímu vedení – zapojení do T

Pro napájení obou traťových směrů se používá pouze jeden trakční transformátor nezávisle na tom, zda se jedná o jednokolejný nebo dvojkolejný úsek (viz *obr. 2.2*).

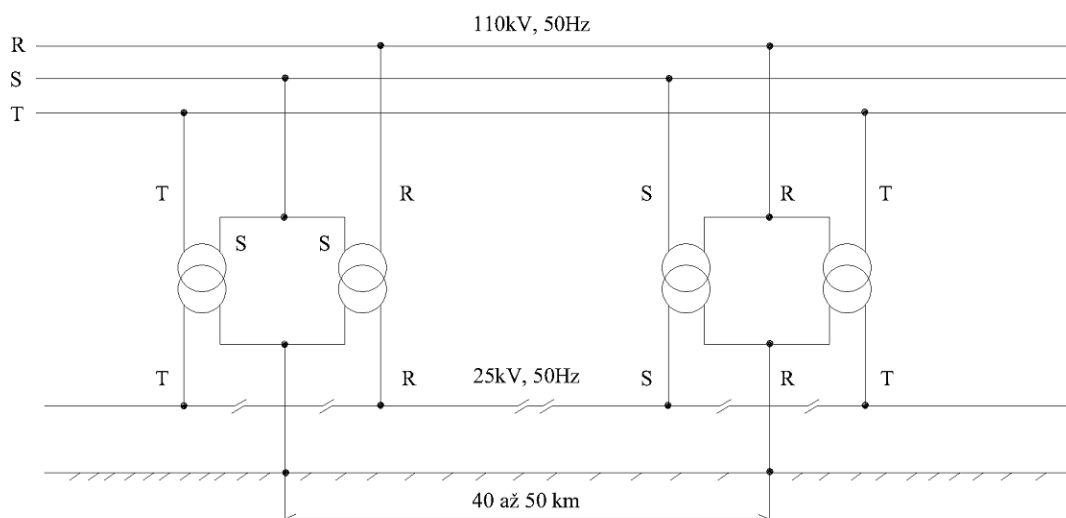


Obrázek 2.2 - Schéma připojení TNS 25kV, 50Hz k trakčnímu vedení – zapojení do T

Tento typ zapojení je nejčastější, ale z hlediska nesymetrie je toto zapojení nevýhodné. Vzdálenost TNS 25kV, 50Hz je při tomto zapojení transformátorů přibližně 40 km.

2.3.2. Schéma připojení TNS 25kV, 50Hz k trakčnímu vedení – zapojení do L

Jeden trakční transformátor napájí směr „doleva“ a druhý trakční transformátor směr „doprava“, nezávisle na tom zda se jedná o jednokolejný či dvojkolejný traťový úsek. Toto schéma se používá u vytížených tratí popřípadě tam, kde je TNS 25kV, 50Hz připojena do sítě s malým zkratovým výkonem a je nutné snížit nesymetrii zátěže této sítě [1].



Obrázek 2.3 - Schéma připojení TNS 25kV, 50Hz k trakčnímu vedení – zapojení do L

2.4. FKZ v TNS 25kV, 50Hz

2.4.1. Důvody doplnění FKZ do TNS 25kV, 50Hz

ČD a ČD Cargo provozují na jednofázové trakční soustavě 25 kV, 50 Hz elektrická hnací vozidla, jejichž koncepce trakčního obvodu je poplatná době jejich vzniku, tj. šedesátým létům minulého století. Vstupní schéma jejich trakčního obvodu je tvořeno jednofázovým diodovým (neřízeným) můstkem, jak bylo v té době obvyklé. Dvoupulzně usměrněným napětím jsou pak napájeny přes vyhlazovací tlumivky stejnosměrné sériové trakční motory.

Uvedená skutečnost způsobuje, že tato elektrická hnací vozidla vykazují vůči jednofázové trakční soustavě 25 kV, 50 Hz dvě nevýhodné vlastnosti, jejichž význam se zpřisňujícími se požadavky distributora elektrické energie roste. Jedná se o tyto vlastnosti:

- „Účinník odebíraného výkonu vykazuje v průměru hodnotu kolem cca. 0,84, což odporuje požadavku distributora elektrické energie, podle kterého je odběratel povinen odebírat elektrickou energii s hodnotou induktivního účinníku 0,95 – 1,00; pokud se distributor elektrické energie s odběratelem nedohodnou jinak a s výjimkou odběrů pro domácnost.“ [1]
- „Časový průběh proudu odebíraného z trakčního vedení je značně deformován, elektrické hnací vozidlo se zde jeví jako generátor proudových harmonických všech lichých řádů, jejichž amplituda je v trakčně ustáleném stavu nepřímou úměrnou řádu harmonické (např. obsah 3. harmonické odebíraného proudu dosahuje až 33 % základní harmonické), tyto proudové harmonické pak na impedanci distribuční soustavy 110 kV způsobují nežádoucí harmonické napětí, zkreslující sinusový průběh napětí této distribuční soustavy i pro ostatní odběratele.“[1].

Aby SŽE mohla vyhovět požadavkům distributora elektrické energie, osazuje do TNS 25 kV, 50 Hz FKZ.

2.4.2. Funkce FKZ v TNS 25kV, 50Hz

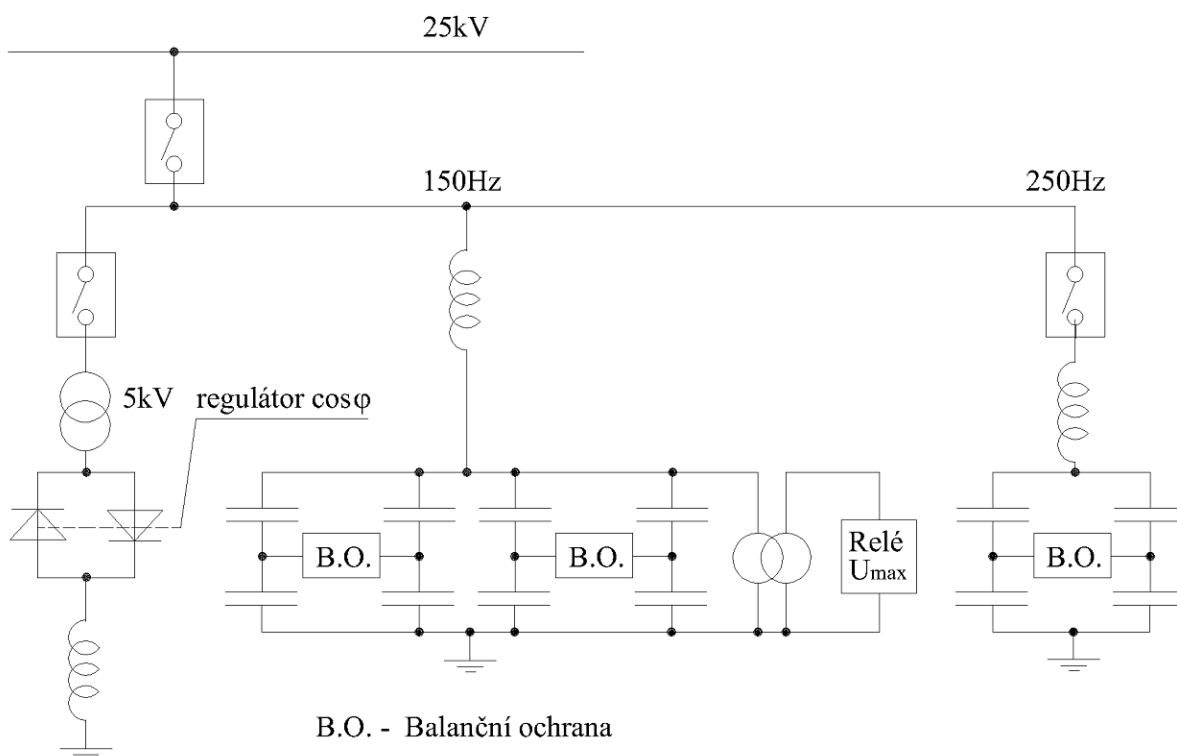
FKZ má splňovat v TNS 25kV, 50Hz následující konkrétní požadavky:

- „Vykompenzovat induktivní jalový výkon elektrických hnacích vozidel s diodovým či tyristorovým trakčním měničem tak, aby v připojovacím bodě TNS 25kV, 50Hz k distribuční soustavě 110kV distributora elektrické energie byl dodržen induktivní účinník základní harmonické DPF ($\cos \varphi_1$) na hodnotě mezi 0,95 – 1.“[1]

- „Zabránit přechodu hodnot tohoto účinníku DPF ($\cos \varphi_1$) do kapacitní oblasti v případě, že odpadl trakční odběr.“[1]
- „Omezit hodnoty napěťových případně proudových harmonických v připojovacím bodě TNS 25kV, 50Hz k distribuční soustavě 110kV tak, aby v tomto bodě byly dodrženy mezní hodnoty jednotlivých harmonických požadované distributorem elektrické energie.“[1]
- „Zajistit, aby vstupní impedance TNS 25kV, 50Hz jako celku včetně připojených úseků trakčního vedení splňovala pro ovládací frekvenci soustavy hromadného dálkového ovládání distributora elektrické energie jím požadovanou minimální hodnotu, a to jak pro stav trakčně naprázdno, tak i pro zadaný trakční odběr.“[1]

2.4.3. FKZ dnešní koncepce

Dnešní koncepce FKZ obsahuje dvě paralelně řazené sériové LC větve (laděné do blízkosti 3. a 5. harmonické) doplněné paralelně připojenou odepínatelnou dekompenzační větví, obsahující snížovací transformátor, dekompenzační tlumivku a tyristorový fázový regulátor (viz *obrázek 2.4*).



Obrázek 2.4 - FKZ dnešní koncepce [1]

3. Chyba převodu a úhlu přístrojových transformátorů v rozvodně 110kV TNS 25kV, 50Hz při sinusovém průběhu napětí a proudu

3.1. Provedení přístrojových transformátorů

Přístrojové transformátory s izolačním napětím 123kV, které jsou umístěny v rozvodně 110kV TNS 25kV, 50Hz, mají uzavřený feromagnetický obvod.

3.1.1. Provedení přístrojového transformátoru proudu

3.1.1.1. Feromagnetický obvod přístrojového transformátoru proudu

Feromagnetický obvod přístrojového transformátoru proudu je složený z transformátorových plechů do tvaru obdélníku nebo prstence. Feromagnetický obvod lze rozdělit na jádro a spojku, přičemž spojka je obepínaná sekundárním a primárním vinutím. Přístrojový transformátor proudu má na rozdíl od přístrojových transformátorů napětí zvlášť feromagnetický obvod (prsteneček) pro sekundární vinutí měřicí a zvlášť pro sekundární vinutí jistící.

Feromagnetický obvod složený z transformátorových plechů složených do tvaru obdélníku se u přístrojových transformátorů proudu s izolačním napětím 123kV dnes již nepoužívá. Jeho využití je možné tam, kde není požadavek na vysokou přesnost měření.

Přístrojové transformátory proudu s izolačním napětím 123kV používané v rozvodnách 110kV TNS 25kV, 50Hz mají feromagnetický obvod složený z transformátorových plechů složených do tvaru prstence. Sekundární vinutí je navinuté pouze na určitou část tohoto prstencového feromagnetického obvodu. Vodič přivádějící měřený primární proud představuje „primární vinutí“. Tento vodič je v podstatě tyč (vysoká zkratuvzdornost), která prochází prstencem a tímto průchodem skrz střed prstence vzniká 1 závit. Proto jsou tyto přístrojové transformátory proudu označovány jako tyčové. Tyčové přístrojové transformátory proudu v rozvodně 110kV TNS 25kV 50Hz mají většinou jmenovitý převod proudu 100-300/5A. Feromagnetický obvod ve tvaru prstence je výhodný zejména kvůli tomu, že magnetický tok buzený primárním proudem je ve směru magnetických domén orientovaných plechů. Tím je dosaženo:

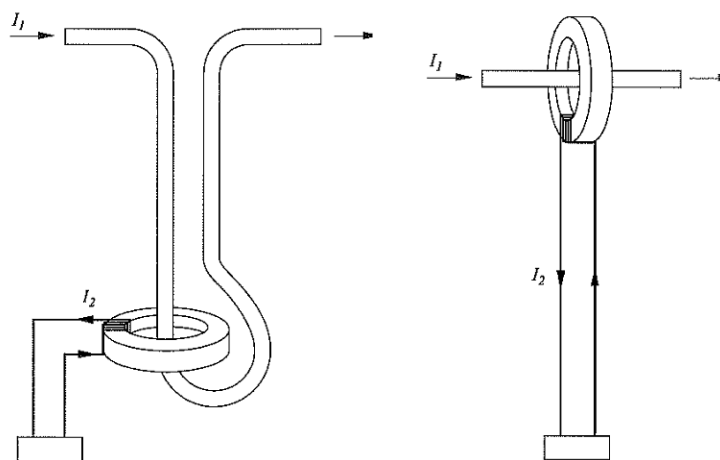
- nízká reluktance,
- nízké ztráty v jádru,
- vysoké permeability.

Plechý, ze kterých je složen feromagnetický obvod ve tvaru prstence jsou z materiálů obsahující nikl, který zajišťuje vysokou permeabilitu. Nejvíce používané materiály jsou:

- mumetal (70% Ni),
- permandur (50% Co, 50% Fe),
- hipernik (50% Ni, 50% Fe).

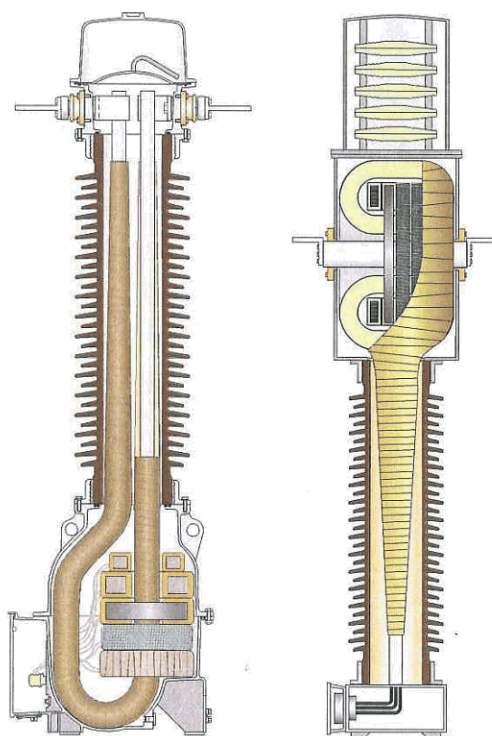
Všechny tyto materiály mají svoje výhody a nevýhody. Materiál je zvolen vždy na základě požadavků na dané sekundární vinutí (měření, jištění).

Podle toho zda je uzavřený feromagnetický obvod v horní nebo spodní části přístrojového transformátoru proudu, rozlišujeme tyčový přístrojový transformátor proudu s uzavřeným feromagnetickým obvodem dole a tyčový přístrojový transformátor proudu s uzavřeným feromagnetickým obvodem nahoře viz. **obrázek 3.1**. Oba typy tyčových přístrojových transformátorů proudu jsou v rozvodnách 110kV TNS 25kV AC používány. První typ je častější a vyrábí ho firma Pfiffner (typ JOF) a ABB (typ IMB). Druhý typ vyrábí firma Areva (OSKTF).



Obrázek 3.1 - a) tyčový přístrojový transformátor proudu s uzavřeným feromagnetickým obvodem dole, **b)** tyčový přístrojový transformátor proudu s uzavřeným feromagnetickým obvodem nahoře [5]

Na **obrázku 3.2** jsou řezy tyčovými přístrojovými transformátory proudu s uzavřeným feromagnetickým obvodem dole a s uzavřeným feromagnetickým obvodem nahoře.



Obrázek 3.2 – Řez tyčovým přístrojovým transformátorem proudu s uzavřeným feromagnetickým obvodem dole a nahoře [5]

V rozvodnách 110kV TNS 25kV AC se používají i kombinované přístrojové transformátory napětí a proudu. Mezi hlavní výhody těchto přístrojů patří malá záběrná plocha, která je však vyvážena nevýhodami jako omezený prostor pro uzavřený feromagnetický obvod přístrojového transformátoru proudu a z toho plynoucí omezení v proudovém rozsahu převodu.

3.1.1.2. Uspořádání přístrojového transformátoru proudu

Příklad vzhledu tyčového přístrojového transformátoru proudu s uzavřeným feromagnetickým obvodem dole je na *obrázku 3.3 a)* a na *obrázku 3.3 b)* je řez tímto přístrojovým transformátorem proudu.



Obrázek 3.3a - Příklad tyčového přístrojového transformátoru proudu pro venkovní použití s uzavřeným feromagnetickým obvodem dole **b)** řez tímto tyčovým přístrojovým transformátorem proudu [6]

kde:

1. Plynové tlumení - hermeticky uzavřený expanzní systém kompenzující změny tlaku kvůli změnám teploty. Většinou je použit dusičný plyn.
2. Ventil pro plnění oleje
3. Křemičitá výplň - volný prostor v tyčovém přístrojovém transformátoru proudu je vyplněn čistým a suchým pískem. Křemičitý písek redukuje množství oleje nezbytné uvnitř přístrojového transformátoru proudu kvůli zajištění dlouhé životnosti izolačního papíru (sulfátový papír). Křemičitý písek nejen, že izoluje, ale navíc zajišťuje mechanickou pevnost feromagnetického obvodu přístrojového transformátoru proudu a primárního vinutí.
4. Primární vodič - primární vinutí obsahuje jednu nebo více tyčí z Al nebo Cu ohnutých tak aby tvořili závit, jak je ukázáno v řezu na **obrázku 3.1**.
5. Feromagnetický obvod / Sekundární vinutí - feromagnetický obvod sekundárního vinutí pro měření je většinou vyroben z plechů s příměsí niklu,

který poskytuje nízkou úroveň saturace a nízké ztráty a přispívá k dosažení celkové přesnosti. Feromagnetický obvod sekundárního vinutí pro jištění je vyroben z vysoce kvalitních legovaných a orientovaných plechů. Sekundární vinutí je navrženo s dvojitě lakovaným měděným drátem.

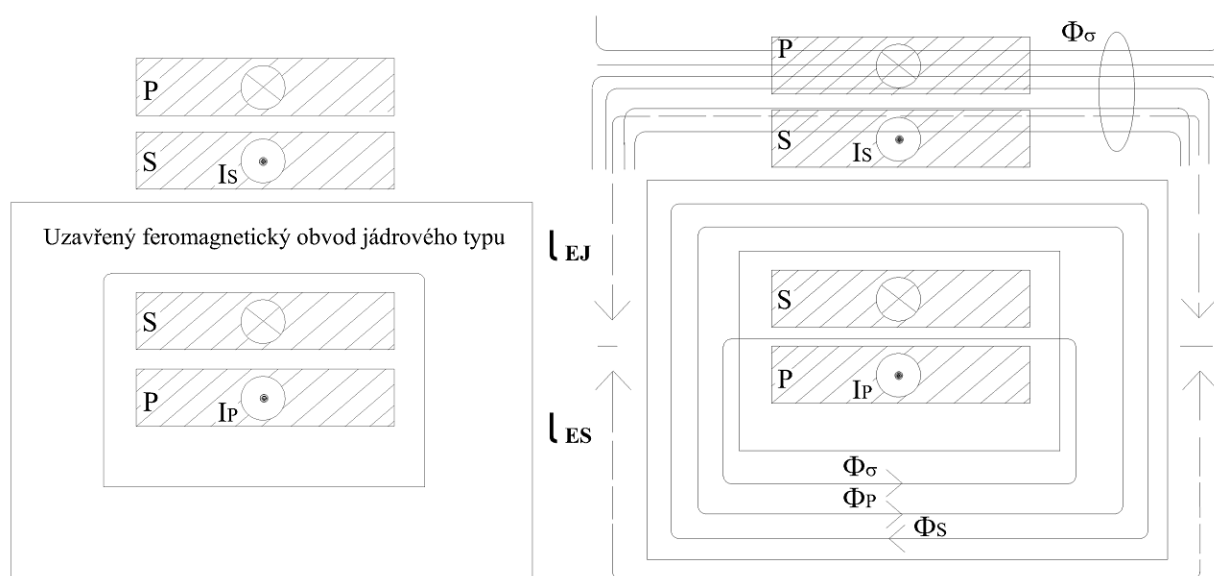
6. Připojovací skříňka sekundárních svorek - svorky sekundárního vinutí jsou vyvedeny do připojovací skříňky. Zde se připojují kabely pro měření a ochrany.
7. Kapacitní napěťová odbočka (pouze na požadavek odběratele) - odbočka je vyvedena z druhé do poslední kapacitní vrstvy vysokonapěťové izolace skrz průchodku na nádobě přístrojového transformátoru proudu. Je používána ke kontrole stavu izolace při měření ztrátového úhlu ($\text{tg}\delta$). Může být použita pro indikaci napětí.
Poznámka: kvůli malé hodnotě kapacity je vývod limitován a nemůže se na něj připojit ochranná relé, nebo měřicí přístroje.
8. Expansní nádoba – je naplněna dusíkatým plynem. Navíc, křemičitá výplň podstatně redukuje objem oleje vevnitř přístrojového transformátoru proudu a relativně veliký objem plynu minimalizuje změny tlaku.
9. Stavoznak oleje
10. Primární svorky
11. Zemní svorka přístrojového transformátoru proudu.

3.1.2. Provedení přístrojového induktivního transformátoru napětí

3.1.2.1. Feromagnetický obvod přístrojového induktivního transformátoru napětí

Feromagnetický obvod přístrojového induktivního transformátoru napětí je složen z transformátorových plechů válcovaných za studena (nízká rozptylová indukčnost), které mají plochou magnetizační křivku. Feromagnetický obvod je předimenzován, aby zajistil velmi malý tok při jmenovitém napětí.

Na *obrázku 3.4.* je zobrazen uzavřený feromagnetický obvod jádrového typu přístrojového induktivního transformátoru napětí. Na rozdíl od přístrojového transformátoru proudu je uzavřený feromagnetický obvod společný vždy pro obě sekundární vinutí (měření, jištění).

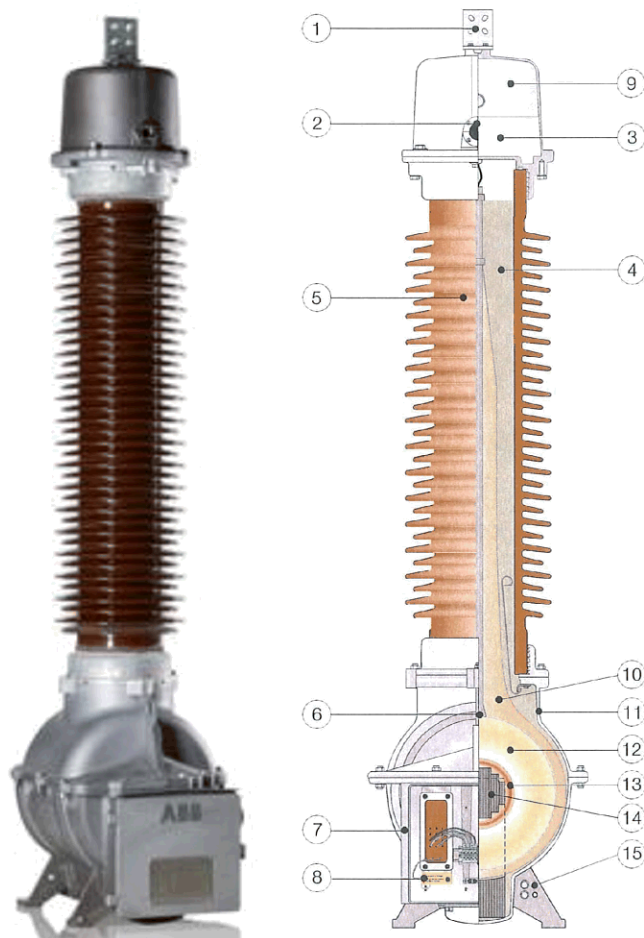


Obrázek 3.4 – Uzavřený feromagnetický obvod přístrojového indukčního transformátoru napětí jádrového typu s jedním sek. vinutím

- kde:
- P primární vinutí přístrojového transformátoru napětí [závit]
 - S sekundární vinutí přístrojového transformátoru napětí [závit]
 - I_S proud sekundárním vinutím [A]
 - I_P proud primárním vinutím [A]
 - Φ_σ rozptylový tok buzený I_P [Wb]
 - Φ_P magnetický tok buzený primárním proudem [Wb]
 - Φ_S magnetický tok buzený sekundárním proudem [Wb]
 - ℓ_{EJ} délka jádra uzavřeného feromagnetického obvodu [m]
 - ℓ_{ES} délka spojky uzavřeného feromagnetického obvodu [m]

3.1.2.2. Uspořádání přístrojového indukčního transformátoru napětí

Příklad vzhledu přístrojového indukčního transformátoru napětí s uzavřeným feromagnetickým obvodem jádrového typu je na **obrázku 3.5 a)** a na **obrázku 3.5 b)** je zobrazen řez tímto přístrojem.



Obrázek 3.5a) - Příklad přístrojového induktivního transformátoru napětí s uzavřeným feromagnetickým obvodem pro venkovní použití **b)** řez tímto přístrojovým induktivním transformátorem napětí [7]

kde:

1. Primární svorky – připojovací konektor, pro horizontální nebo vertikální připojení k primárnímu vodiči.
2. Referenční sklo – stavoznak hladiny oleje.
3. Olej - elektromagnetická jednotka je izolována olejem v hermeticky uzavřené hliníkové nádobě se standardním transformátorovým olejem.
4. Křemičitá výplň - volný prostor v přístrojovém transformátoru napětí je vyplněn čistým a suchým pískem. Křemičitý písek redukuje množství oleje nezbytného uvnitř přístrojového transformátoru napětí kvůli zajištění dlouhé životnosti izolačního papíru (sulfátový papír). Křemičitý písek nejen, že izoluje, ale navíc zajišťuje mechanickou pevnost feromagnetického obvodu přístrojového transformátoru napětí a primárního vinutí.

5. Izolátor - je vyroben z vysoce kvalitního glazovaného porcelánu, typická barva je hnědá.
6. Závěsné oko
7. Připojovací skříňka - svorky sekundárního vinutí jsou vyvedeny do připojovací skříňky. Zde se připojují kabely pro měření a ochrany
8. Bezpotenciálová koncová svorka
9. Plynové tlumení - hermeticky uzavřený expansní systém kompenzující změny tlaku vznikající kvůli změnám teploty. Většinou je použit dusičný plyn.
10. Papírová izolace
11. Nádoba - nádoba je většinou vyrobena z žárově zinkované oceli.
12. Primární vinutí - primární vinutí je typicky konstruováno jako vícevrstvá cívka s dvojitě lakovaným vodičem, která je izolovaná od sekundárního vinutí, feromagnetického obvodu lepenkou nebo papírem.
13. Sekundární vinutí - přístrojový transformátor napětí má často dvě sekundární vinutí – první pro měření, druhé pro jištění. Vinutí jsou navržena s dvojitě lakovaným drátem a jsou izolovány od feromagnetického obvodu a primárního vinutí lepenkou nebo papírem.
14. Feromagnetický obvod - je vyroben z materiálu, který má plochou magnetizační křivku. Feromagnetický obvod je předimenzován, aby zajistil velmi malý tok na jmenovitém napětí.
15. Uzemnění

3.1.3. Provedení přístrojového kapacitního transformátoru napětí

3.1.3.1. Feromagnetický obvod přístrojového kapacitního transformátoru napětí

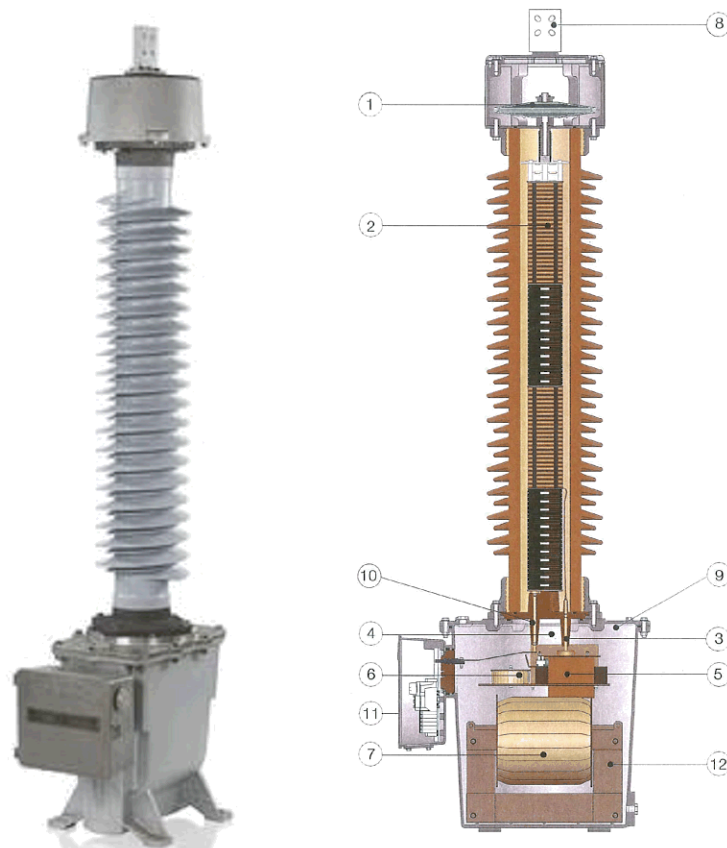
Přístrojový kapacitní transformátor napětí obsahuje kapacitní dělič, který zajišťuje snížení primárního napětí na napětí 4-10kV (rozdílné podle výrobce) a teprve poté je toto napětí dále sníženo středněnapěťovým transformátorem napětí na napětí výstupní vhodné pro měřicí a jistící přístroje. Pro feromagnetický obvod středněnapěťového transformátoru platí stejné závěry, jako pro přístrojový induktivní transformátor napětí viz *bod 3.1.2.1.*

3.1.3.2. Uspořádání přístrojového kapacitního transformátoru napětí

Na *obrázku 3.6 a)* je zobrazen příklad přístrojového kapacitního transformátoru napětí pro venkovní použití a na *obrázku 3.6 b)* zobrazen řez tímto přístrojovým kapacitním

transformátorem napětí. Přístrojový kapacitní transformátor napětí se skládá ze dvou konstrukčních celků:

- A. Kapacitní dělič - sekce sériově zapojených kondenzátorů
- B. Elektromagnetická jednotka - podpěrná skříň s elektromagnetickým příslušenstvím



Obrázek 3.6 a) - Příklad přístrojového kapacitního transformátoru napětí pro venkovní použití, **b)** řez přístrojovým kapacitním transformátorem napětí [8]

kde:

A – kapacitní napěťový dělič

1. Olejem naplněná expanzní komora - vysokonapěťové kondenzátory mají dielektrikum z vysoce kvalitní polypropylénové fólie/dielektrického papíru zalitého vysoce kvalitním syntetickým olejem. V případě nadměrného tlaku vlétně olej do expanzní komory, prorazí membránu a tlak se sníží. Proražená membrána dává vizuální indikaci o poruše.
2. Kondenzátory – C_1 i C_2 obsahuje velký počet sériově zapojených, olejem izolovaných vysokonapěťových kondenzátorů. Kondenzátory jsou konstruovány s respektováním požadavků na přesné měření. Aktivní část obsahuje hliníkovou

fólii, izolovanou papírem/polypropylenovou fólií, která je impregnována bezolovnatým syntetickým olejem. Kvůli výjimečným proporcím mezi papírem a polypropylenovou fólií, dielektrikum vykazuje nezávislost na změnách teploty.

3. Vývod do středněnapěťového transformátoru
8. Připojovací konektor primárního vodiče
10. Vývod sekundárního vinutí do připojovací skříňky.

B – elektromagnetická jednotka

4. Sklo stavoznaku oleje
5. Kompenzační tlumivka - tlumivka připojená do série mezi kapacitní dělič a primární vinutí středněnapěťového transformátoru. Tlumivka kompenzuje posun fázového úhlu způsobeného kapacitním děličem. Kapacitní a induktivní reaktance jsou laděny pro každý přístrojový kapacitní transformátor napětí před testováním přesnosti.
6. Tlumicí zařízení ferorezonance.
7. Primární a sekundární vinutí středněnapěťového transformátoru.
9. Plynové tlumení - hermeticky uzavřený expansní systém kompenzující změny tlaku vznikající kvůli změnám teploty. Většinou je použit dusičný plyn.
11. Připojovací skříňka – svorky sekundárního vinutí jsou vyvedeny do připojovací skříňky. Zde se připojují kabely pro měření a ochrany.
12. Feromagnetický obvod středněnapěťového transformátoru.

3.2. Náhradní schéma přístrojového transformátoru

3.2.1. Náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu a induktivního transformátoru napětí platné v okolí jmenovité frekvence

Náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu a přístrojového transformátoru napětí je možné uvažovat společně, protože oba přístrojové transformátory mají feromagnetický obvod složený z transformátorových plechů (rozdílné jsou použité materiály) a je v obou případech uzavřený. Feromagnetický obvod obou přístrojových transformátorů lze rozdělit na spojku a jádro, přičemž spojka je část feromagnetického obvodu obepínaná vinutím a má délku ℓ_{ES} viz **obrázek 3.4** a jádro je část feromagnetického obvodu, která není obepínaná vinutím a má délku ℓ_{EJ} .

Přístrojový transformátor proudu má uzavřený feromagnetický obvod ve tvaru prstence, který je samostatný pro každé sekundární vinutí. Přístrojový transformátor napětí má uzavřený feromagnetický obvod ve tvaru obdélníku a je společný pro obě sekundární vinutí.

Tok energie je u obou typů přístrojových transformátorů z vnějšího vinutí do vnitřního, jak je obvyklé. Vnější vinutí (vstupní) je označováno jako primární a vnitřní vinutí (výstupní) je označováno jako sekundární. Proud v primárním vinutí I_P budí magnetický tok Φ_P , který zabírá s oběma vinutími a prochází jen feromagnetickým obvodem a zároveň I_P budí rozptylový tok Φ_σ , který zabírá pouze s primárním vinutím. Sekundární proud I_S budí magnetický tok Φ_S , který se uzavírá pouze feromagnetickým obvodem a zabírá s oběma vinutími viz. **obrázek 3.4**.

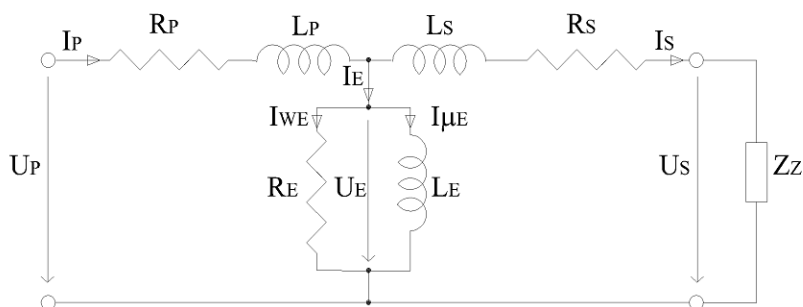
Celková rozptylová indukčnost buzená primárním proudem se rozdělí za předpokladu $N_P=N_S$ takto:

$$L_\sigma = L_P + L_S \quad [\text{H}] \quad (3.1)$$

kde: L_P rozptylová indukčnost primárního vinutí [H]

L_S rozptylová indukčnost sekundárního vinutí [H]

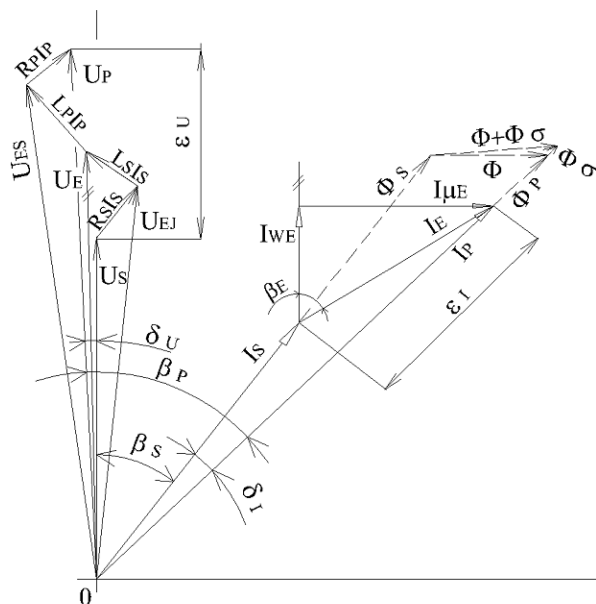
Na **obrázku 3.7** je společné náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu a napětí s uzavřeným feromagnetickým obvodem platné v okolí jmenovité frekvence a při $N_P = N_S$. Hodnoty jednotlivých prvků náhradního schématu jsou však pro oba typy přístrojových transformátorů odlišné. Zatímco přístrojový transformátor proudu pracuje ve stavu blízkém stavu transformátoru „nakrátko“ a je konstruován, tak aby měl co nejvyšší průchozí impedanci (co nejnížší hodnotu R_P , R_S , L_P , L_S , R_E a co nejvyšší L_E). Přístrojový induktivní transformátor napětí pracuje ve stavu blízkém transformátoru „naprázdno“ a je snaha, aby měl co nejnížší průchozí impedanci (co nejnížší hodnoty R_P , L_P , R_S , L_S) a vzhledem k malému sycení feromagnetického obvodu mají R_E a L_E přístrojového transformátoru napětí menší vliv na přesnost měření než u přístrojového transformátoru proudu..



Obrázek 3.7 - Společné náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu a napětí s uzavřeným feromagnetickým obvodem platné v okolí jmenovité frekvence 50Hz a za předpokladu $N_P = N_S$

- kde: I_P primární proud [A]
 U_P primární napětí [V]
 R_P činný odpor primárního vinutí [Ω]
 L_P rozptylová indukčnost primárního vinutí [H]
 U_E elektromotorické napětí [V]
 I_{WE} celkový proud kryjící ztráty v železe pro spojku a jádro [A]
 $I_{\mu E}$ celkový magnetizační proud jádra a spojky [A]
 I_E magnetizační proud [A]
 R_E odpor reprezentující ztráty hysterezní a vířivé ve spojce a jádře [Ω]
 L_E magnetizační indukčnost spojky a jádra [H]
 L_S rozptylová indukčnost sekundárního vinutí [H]
 R_S činný odpor sekundárního vinutí [Ω]
 U_S sekundární napětí [V]
 I_S sekundární proud [A]
 Z_Z vnější zátěž přístrojového transformátoru [Ω]

Na **obrázku 3.8** je vektorový diagram veličin společného náhradního schématu přístrojového transformátoru proudu a napětí s uzavřeným feromagnetickým obvodem za předpokladu $N_P = N_S$.



Obrázek 3.8 - Vektorový diagram veličin společného náhradního schématu přístrojového transformátoru proudu a napětí s uzavřeným feromagnetickým obvodem za předpokladu $N_P = N_S$

- kde: ε_I chyba proudu u přístrojových transformátorů proudu [%]

δ_I	chyba úhlu u přístrojových transformátorů proudu [']
ε_U	chyba napětí u přístrojových transformátorů napětí [%]
δ_U	chyba úhlu u přístrojových transformátorů napětí [']
β_P	úhel mezi U_P a I_P [°]
β_S	úhel mezi U_S a I_S [°]
Φ	hlavní magnetický tok [Wb]
Φ_σ	rozptylový tok buzený primárním proudem [Wb]
Φ_P	magnetický tok buzený primárním proudem [Wb]
Φ_S	magnetický tok buzený sekundárním proudem [Wb]

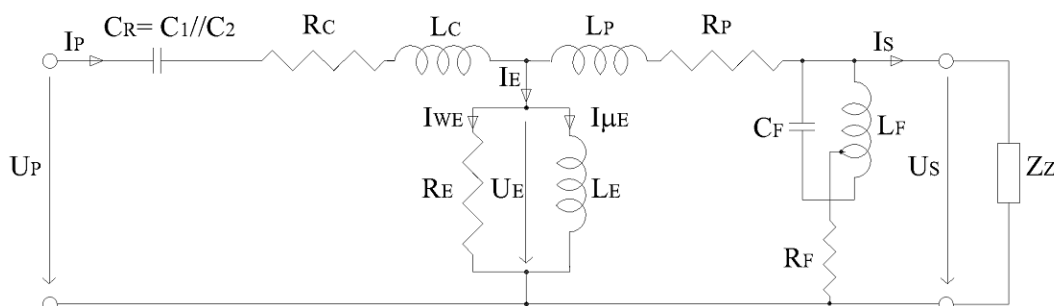
Z vektorového diagramu na **obrázku 3.8** vyplývá, že primární veličiny (proud i napětí) se transformují na sekundární stranu s určitou chybou. Algebraický rozdíl délek vektorů $I_S - I_P$ je chybou proudu ε_I a algebraický rozdíl délek $U_S - U_P$ je chybou napětí ε_U .

Fázový posun mezi vektorem sekundární veličiny a vektorem veličiny primární je chyba úhlu δ_I (u proudů) nebo δ_U (u napětí).

Přístrojový transformátor může transformovat pouze jednu veličinu a podle toho jsou přístrojové transformátory napětí a proudu.

3.2.2. Náhradní schéma přístrojového kapacitního transformátoru napětí

Na **obrázku 3.9** je náhradní schéma přístrojového kapacitního transformátoru napětí s aktivním tlumícím zařízením.



Obrázek 3.9 - Náhradní schéma přístrojového kapacitního transformátoru napětí s aktivním tlumícím zařízením platné v okolí jmenovité frekvence a za předpokladu $N_P = N_S$ [9]

kde: C_R Celková kapacita kondenzátoru C_1 a C_2 , přičemž platí:
 $C_1 \gg C_2$
 R_C, L_C náhradní prvky kompenzační tlumivky

L_P, R_P, L_E, R_E	náhradní prvky středněnapětového transformátoru
C_F, L_F, R_F	náhradní prvky tlumícího zařízení
Z_Z	impedance zátěže

3.3. Princip přístrojového transformátoru proudu

V této kapitole jsou podrobně zkoumány faktory ovlivňující chybu převodu a úhlu přístrojových transformátoru proudu při sinusovém průběhu primárního proudu.

➤ Chyba proudu (převodu) – ε_I

Chyba je způsobena rozptylovou indukčností a ztrátami ve vinutí přístrojového transformátoru a způsobí, že skutečný převod není roven jmenovitému převodu.

➤ Chyba úhlu – δ_I

Rozdíl fáze mezi fázory primárního proudu a proudu na zátěži; orientace fázorů primárních a sekundárních proudů je volena tak, že u ideálního přístrojového transformátoru je chyba nulová. Chyba úhlu se považuje za kladnou, jestliže fázor sekundárního proudu předchází fázor primárního proudu. Obvykle bývá vyjádřena v úhlových minutách nebo centiradiánech.

3.3.1. Charakteristika funkce

Přístrojové transformátory proudu s izolačním napětím 123kV, které jsou umístěny v rozvodnách 110kV TNS 25kV, 50Hz zajišťují vstupní analogové měření pro statické elektroměry a jištění. Jelikož jsou jiné nároky na sekundární vinutí pro účely fakturačního měření a jiné pro účely jištění, mají přístrojové transformátory proudu oddělené feromagnetické obvody pro jednotlivá sekundární vinutí s různými vlastnostmi.

Primární vinutí přístrojových transformátorů proudu (1 - 3 závity) je zapojeno do série s obvodem, jehož proud se transformuje do obvodu sekundárního. Poměr počtu závitů primárního vinutí N_P a sekundárního vinutí N_S je určen (zanedbáme-li chybu proudu) poměrem primárního proudu I_P a sekundárního proudu I_S .

Jmenovitý převod proudu je definován jako poměr jmenovitého primárního proudu k

jmenovitému sekundárnímu proudu [10]:
$$K_n = \frac{N_P}{N_S} = \frac{I_{Pn}}{I_{Sn}} \quad [-] \quad (3.2)$$

a chyba převodu přístrojového transformátoru proudu je definována poměrem [10]:

$$\varepsilon_I = \frac{(K_n \cdot I_S - I_P) \cdot 100}{I_P} \quad [\%] \quad (3.3)$$

kde: K_n jmenovitý převod přístrojového transformátoru proudu [-]

I_P skutečný primární proud [A]

I_S skutečný sekundární proud, když protéká I_P za podmínek měření [A]

Norma [10] definuje ještě celkovou chybu přístrojového transformátoru proudu, což je za ustáleného stavu podmínek efektivní hodnota rozdílu mezi:

- okamžitými hodnotami primárního proudu a
- okamžitými hodnotami skutečného sekundárního proudu násobenými jmenovitým převodem; kladné znaménko primárního a sekundárního proudu odpovídá dohodnutým značením svorek.

Celková chyba je obecně vyjadřována v procentech efektivních hodnot primárního proudu podle vzorce [10]:

$$\varepsilon_C = \frac{100}{I_P} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n i_S - i_P)^2 dt} \quad [\%] \quad (3.4)$$

kde: K_n jmenovitý převod přístrojového transformátoru proudu

I_P efektivní hodnota primárního proudu

i_P okamžitá hodnota primárního proudu

i_S okamžitá hodnota sekundárního proudu

T doba trvání jednoho cyklu

Celková chyba se má použít za těch podmínek, kde nelze použít vektorový součet chyby převodu a chyby úhlu a když nelineární podmínky vytvářejí vyšší harmonické v budícím proudu a v sekundárním proudu. V obecném případě tak celková chyba prezentuje odchylku od ideálního přístrojového transformátoru proudu, jež je způsobena přítomností vyšších harmonických v sekundárním vinutí, které neexistují v primárním vinutí (norma [10] uvažuje vždy primární proud sinusového průběhu).

Číselná hodnota celkové chyby bude vždy větší než vektorový součet chyby převodu a chyby úhlu.

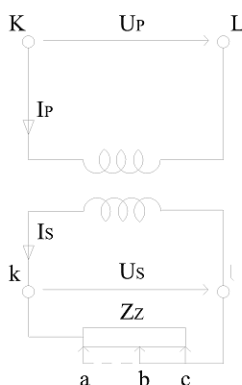
Přístrojový transformátor proudu lze charakterizovat chodem transformátoru nakrátko, tedy impedance magnetizační větve musí být co nejvyšší, aby proud magnetizační větví na kterém je závislá chyba převodu a úhlu byl co nejmenší.

Při nulovém vnějším břemeni ($Z_Z = 0$) jsou sekundární svorky k, ℓ nakrátko (**obrázek 3.10** - jezdec v poloze a). S rostoucím břemenem roste napětí $U_S = Z_Z \cdot I_S^2$ a tím i napětí U_P (**obrázek 3.10** - jezdec v poloze b nebo c).

Výkon spotřebovaný vnějším břemenem je vyjádřen takto:

$$P_Z = U_S \cdot I_S = Z_Z \cdot I_S^2 \text{ [W]} \quad (3.5)$$

a nazývá se zátěž transformátoru proudu. Vzroste-li břemeno Z_Z a tím i sekundární napětí U_S nade všechny meze (např. rozpojí-li se sekundární obvod), nastane nebezpečný poruchový stav, který vede k proražení izolace sekundárního vinutí, tedy k mezizávitovému zkratu.



Obrázek 3.10 - Princip přístrojového transformátoru proudu [12]

Vnější břemeno přístrojového transformátoru proudu tvoří měřicí, jistící přístroje připojené na sekundární vinutí přístrojového transformátoru proudu a kabelové příводы k nim. V případě sekundárního vinutí pro měření tvoří vnější břemeno vstupní impedance elektroměru Z_{EL} a k němu paralelně řazená kapacita přívodního kabelového vedení C_K . Sekundární účinník vnějšího břemene je označen $\cos \beta_Z$.

Celková vstupní impedance elektroměru obsahuje sériově řazené R_{EL} a L_{EL} (nebo sériově řazené R_{EL} a C_{EL}) podle typu elektroměru [11] viz **obrázek 3.11**:

$$|Z_{EL1}| = \sqrt{R_{EL}^2 + (\omega L_{EL})^2} \text{ [\Omega]} \text{ nebo } |Z_{EL2}| = \sqrt{R_{EL}^2 + \frac{1}{(\omega C_{EL})^2}} \text{ [\Omega]} \quad (3.6)$$

kde: Z_{EL1} celková vstupní impedance elektroměru induktivního charakteru [Ω]

R_{EL} činný odpor elektroměru [Ω]

L_{EL} indukčnost elektroměru [H]

Z_{EL2} celková vstupní impedance elektroměru kapacitního charakteru [Ω]

C_{EL} kapacita elektroměru [F]

ω úhlová frekvence [Hz]

Pak pro celkovou impedanci vnějšího břemene, která obsahuje paralelní zapojení $|Z_{EL}|$ a kapacity přívodních kabeláží C_K mezi statickým elektroměrem a sekundárním vinutí (viz **obrázek 3.11**) platí:

$$|Z_Z| = \frac{1}{|Z_{EL}| + j\omega C_K} = \frac{|Z_{EL}|}{1 + j\omega C_K \cdot |Z_{EL}|} = \frac{|Z_{EL}| \cdot (1 - j\omega C_K \cdot |Z_{EL}|)}{1^2 - (j\omega C_K \cdot |Z_{EL}|)^2} = |Z_{EL}| \cdot \frac{1 - j\omega C_K \cdot |Z_{EL}|}{1 + (\omega C_K \cdot |Z_{EL}|)^2}$$

$$|Z_Z| = |Z_{EL}| \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{1 + (\omega C_K \cdot |Z_{EL}|)^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega C_K \cdot |Z_{EL}|}{1 + (\omega C_K \cdot |Z_{EL}|)^2}\right)^2} \quad [\Omega] \quad (3.7)$$

kde: Z_Z celková impedance vnějšího břemene přístrojového transf. proudu $[\Omega]$

Z_{EL} vstupní impedance elektroměru $[\Omega]$

C_K kapacita přívodního kabelu k elektroměru $[F]$

V náhradním schématu (viz **obrázek 3.11**) se určí velikost elektromotorického napětí takto:

$$\overline{U_E} = \overline{I_S} \cdot (\overline{Z_Z} + \overline{Z_i}) = \overline{I_S} \cdot \overline{Z_C} \quad [V] \quad (3.8)$$

Kde Z_i je impedance vnitřního břemene přístrojového transformátoru proudu a je rovna:

$$|Z_i| = \sqrt{R_S^2 + (\omega L_S)^2} \quad [\Omega] \quad (3.9)$$

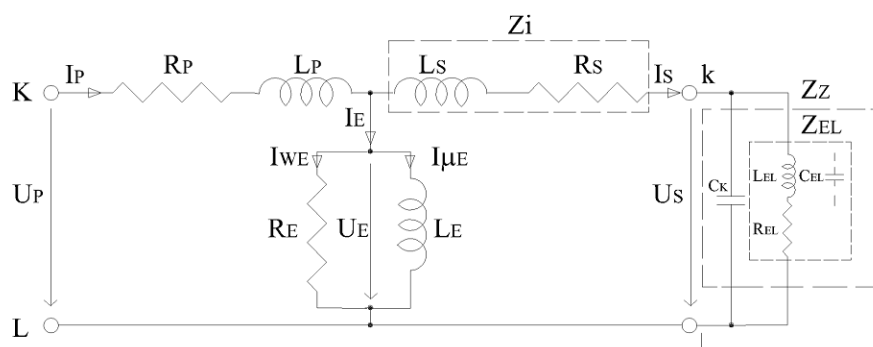
Pro vnitřní břemeno (Z_i), vnitřní zátěž (P_i) a celkovou zátěž (P_C) přístrojového transformátoru proudu platí:

$$P_C = Z_C \cdot I_S^2 \quad [W] \quad (3.10)$$

Mezi (vnější) zátěží, vnitřní zátěží a celkovou zátěží (výkonem) P_C a břemenu Z_C platí vztah:

$$\overline{P_C} = \overline{P_Z} + \overline{P_i} \quad [W], \quad \overline{Z_C} = \overline{Z_Z} + \overline{Z_i} \quad [\Omega] \quad (3.11)$$

Náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu na **obrázku 3.11** je platné v okolí jmenovité frekvence 50Hz a za předpokladu $N_P = N_S$. Vektorový diagram k náhradnímu schématu je na **obrázku 3.12** a platí za stejných podmínek jako náhradní schéma.



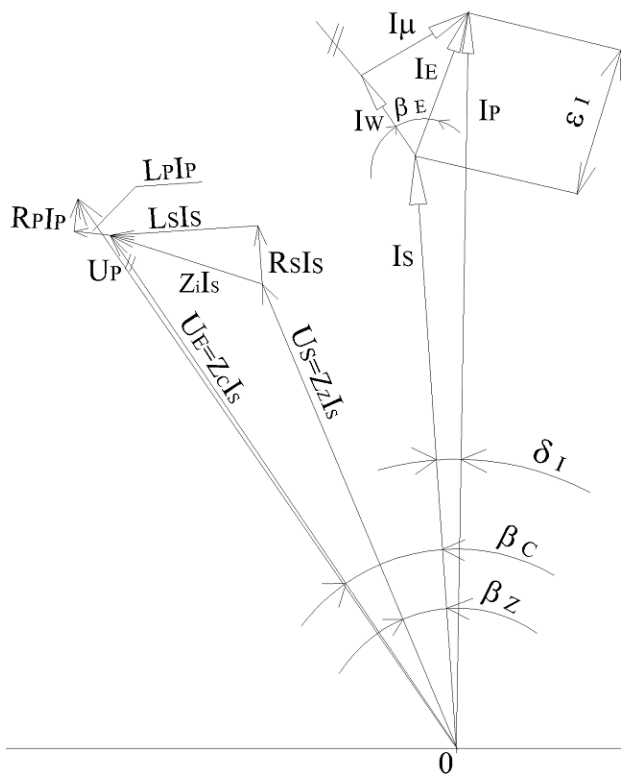
Obrázek 3.11 - Náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu platné v okolí jmenovité frekvence 50Hz a za předpokladu $N_P = N_S$

kde: Z_i vnitřní impedance přístrojového transformátoru proudu $[\Omega]$

C_K kapacita přívodního kabelového vedení k elektroměru $[F]$

L_{EL} indukčnost elektroměru $[H]$

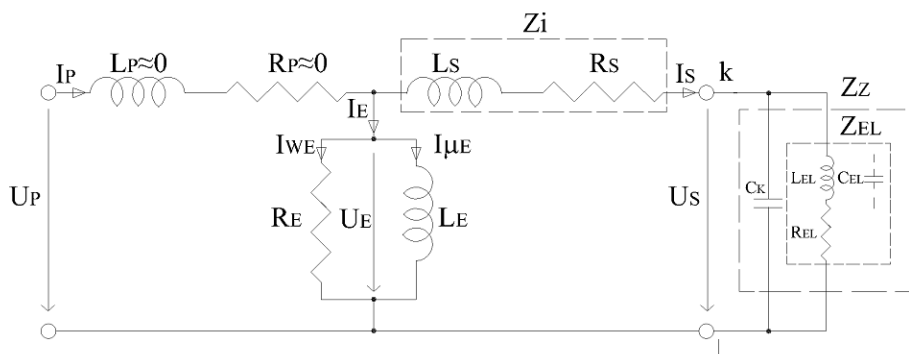
- R_{EL} činný odpor elektroměru [Ω]
 Z_{EL} celková vstupní impedance elektroměru [Ω]
 C_{EL} kapacita elektroměru [F]
 Z_Z celková impedance vnějšího břemene [Ω]



Obrázek 3.12 - Vektorový diagram veličin náhradního schématu přístrojového transformátoru proudu za předpokladu $N_P = N_S$

- kde: $Z_i I_S$ úbytek napětí na impedanci vnitřního břemene [V]
 $\cos \beta_Z$ sekundární účinník vnějšího břemene [$\Omega \cdot H^{-1}$]
 $\cos \beta_C$ sekundární účinník celkového břemene [$\Omega \cdot H^{-1}$]

Zjednodušené náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu s uzavřeným feromagnetickým obvodem je na **obrázku 3.13** a je platné v okolí jmenovité frekvence 50Hz a za předpokladu $N_P=N_S$. V tomto náhradním schématu je zanedbána hodnota R_P a L_P , jelikož primární vinutí tvoří pouze 1-3 tyčové závity.



Obrázek 3.13 - Zjednodušené náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu platné v okolí jmenovité frekvence 50Hz a za předpokladu $N_P=N_S$

Základní rozdíl mezi sekundárním vinutím pro měření a jištění je ve velikosti Z_Z . Hodnota Z_i je u přístrojového transformátoru proudu velmi nízká ca. $0,2\Omega - 1\Omega$.

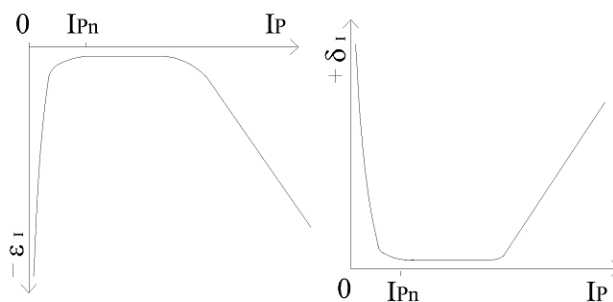
Hodnota Z_Z je u ochranných obvodů v jednotkách ohmů, ale připojený elektroměr má hodnotu vstupní impedance Z_{EL} běžně do $10k\Omega$.

Z toho plyne, že u sekundárních vinutí pro měření je vysoká hodnota U_E respektive velmi nízká hodnota I_E , což je žádoucí kvůli dosažení co nejmenší chyby převodu a úhlu.

3.3.2. Závislost chyby převodu a úhlu na primárním proudu, vnějším břemeni, sekundárním účinníku a kolísání jmenovité frekvence

3.3.2.1. Závislost chyby převodu a úhlu na primárním proudu

V *tabulce 3.1, 3.2 a 3.3* jsou stanoveny maximální chyby převodu a úhlu v rozmezí 50-120% jmenovitého primárního proudu (respektive 1-120% pro přístrojové transformátory proudu pro zvláštní použití, resp. 50-120% pro přístrojové transformátory proudu jisticí). Na *obrázku 3.14* je zobrazena závislost $\varepsilon_I = f(I_P)$ a $\delta_I = f(I_P)$ za respektive před tímto intervalem.



Obrázek 3.14 - Závislost chyby převodu a úhlu přístrojového transformátoru proudu na primárním proudu při konstantním břemeni [12]

Nelineární průběh je způsoben nelineární závislostí $I = f(B_{max})$.

3.3.2.2. Závislost chyby převodu a úhlu na vnějším břemeni

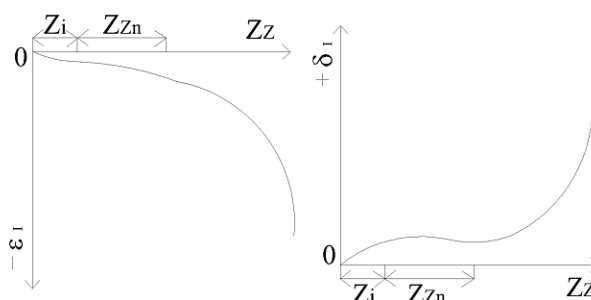
Vnější břemeno je tvořeno impedancí měřicích a jisticích přístrojů připojených na sekundární svorky přístrojového transformátoru proudu včetně paralelně připojené kapacity kabeláže. Břemeno je obvykle vyjádřeno jako zdánlivý výkon ve VA spotřebovaný při stanoveném účinníku a při jmenovitém sekundárním proudu.

Jmenovité břemeno je hodnota zátěže, na níž jsou založeny požadavky na předepsanou přesnost.

Jmenovitá zátěž je hodnota zátěže (ve VA při daném účinníku – 0,8 induktivní), kterou přístrojový transformátor proudu přenáší do sekundárního obvodu při jmenovitém sekundárním proudu a připojeném jmenovitém břemeni.

Jmenovitá zátěž může podle normy [10] nabývat hodnot v rozmezí 25-100% bez výraznějšího vlivu na chybu převodu a úhlu.

Na **Obrázku 3.15** je zobrazena závislost chyby převodu a úhlu na břemeni při jmenovitém primárním proudu.



Obrázek 3.15 - Závislost chyby převodu a úhlu přístrojového transformátoru proudu na vnějším břemeni (při $\beta_Z = \beta_i = \beta_C$) [12]

3.3.2.3. Závislost chyby převodu a úhlu na účinníku vnějšího břemene

Chyba převodu a úhlu přístrojového transformátoru proudu je ovlivněna účinníkem celkového vnějšího břemene $\cos \beta_Z$ a tedy i celkovým účinníkem břemene $\cos \beta_C$, který je součtem účinníku vnějšího a vnitřního účinníku impedance břemene.

Při rostoucím β_Z a tedy i rostoucím β_C se zvětšuje $-\varepsilon_I$ a klesá $+\delta_I$. Při klesajícím β_Z a tedy i klesajícím β_C se snižuje $-\varepsilon_I$ a roste $+\delta_I$.

3.3.2.4. Závislost chyby převodu a úhlu na kolísání jmenovité frekvence

Norma [10] je platná pro přístrojové transformátory proudu pracujících na jmenovité frekvenci, která musí být v rozmezí 15Hz až 100Hz.

Například přístrojový transformátor proudu se jmenovitou frekvencí 50Hz má garantovanou maximální mez chyby převodu a úhlu při frekvenci $\pm 2\text{Hz}$, což je povolené kolísání síťové frekvence.

Magnetizační větev je frekvenčně závislá. Hodnota R_E s rostoucí frekvencí roste a hodnota L_E s rostoucí frekvencí klesá. Přičemž celková impedance magnetizační větve je rovna:

$$|Z_E| = \frac{1}{\sqrt{R_E^2 + (j\omega L_E)^2}} \quad [\Omega] \quad (3.12)$$

kde: Z_E magnetizační reaktance $[\Omega]$

R_E odpor reprezentující ztráty hysterezní a vířivé ve feromagnetickém obvodu $[\Omega]$

L_E magnetizační indukčnost feromagnetického obvodu $[\text{H}]$

Břemeno s konstantní indukčností bude měnit svoji reaktanci úměrně s frekvencí, čímž se bude měnit i účinník vnějšího břemene a tím i celkový účinník břemene.

Chyba převodu i úhlu se bude se zvyšující frekvencí zvyšovat.

3.3.3. Přesnost v provozní a nadproudové oblasti

Přístrojový transformátor proudu má dvě pracovní oblasti, a to oblast provozní, v níž pracuje za normálního provozu v síti, a oblast nadproudovou, kde pracuje při přetížení a poruchových stavech (zkratech) v síti. Hranici mezi oběma oblastmi tvoří jmenovitý trvalý tepelný proud, tj. největší proud, který může trvale procházet jeho primárním vinutím, aniž se překročí dovolená trvalá teplota kterékoli části přístrojového transformátoru proudu, když k sekundárnímu vinutí je připojeno jmenovité břemeno. Přesnost přístrojového transformátoru proudu je v provozní oblasti charakterizována třídou přesnosti (T_p), v nadproudové oblasti pak nadproudovou charakteristikou a nadproudovým číslem (FS).

3.3.3.1. Přesnost v provozní oblasti

Třída přesnosti je vyznačena číslem na štítku. Třída přesnosti je označení přiřazené přístrojovému transformátoru proudu, jehož chyba převodu a úhlu nepřekročí dovolené hodnoty v *tabulkách 3.1, 3.2, 3.3 a 3.4.*

Třída přesnosti je vyznačena nejvyšší přípustnou celkovou chybou převodu a úhlu v procentech při přípustném kolísání jmenovité frekvence, jmenovitého primárního proudu a při

dodržení hodnot jmenovité zátěže v rozmezí 25% - 100% zátěže jmenovité při induktivním účinníku 0,8. U jistících transformátorů proudu ještě následuje označení písmeny PR označující feromagnetický obvod pro jištění s nízkou remanencí. Třída přesnosti je určena zvlášť pro dovolené chyby převodu a úhlu. Třídy přesnosti viz *tabulka 3.1, 3.2, 3.3 a 3.4*:

Třída přesnosti	Chyba převodu (poměr) v procentech jmenovitého proudu uvedeného v následujícím řádku $\pm \varepsilon_1$ [%]				Chyba úhlu v procentech jmenovitého proudu uvedeného v následujícím řádku $\pm \delta_1$ [' nebo cr*]							
					[']				[cr]			
	5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5	0,45	0,24	0,15	0,1
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9
1,0	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60	5,4	2,7	1,8	1,8

Tabulka 3.1 - Dovolené chyby převodu a úhlu měřících transformátorů proudu [10]

* cr = centiradián; 1cr = 34,40'

Třída přesnosti	Chyba převodu (poměr) v procentech jmenovitého proudu uvedeného v následujícím řádku $\pm \varepsilon_1$ [%]					Chyba úhlu v procentech jmenovitého proudu uvedeného v následujícím řádku $\pm \delta_1$ [' nebo cr]									
						[']					[cr]				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,2S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3	0,3
0,5S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9	0,9

Tabulka 3.2 - Dovolené chyby převodu a úhlu pro měřící transformátory proudu pro zvláštní použití [10]

Třída přesnosti	Chyba převodu (poměr) v procentech jmenovitého proudu uvedeného v následujícím řádku $\pm \varepsilon_1$ [%]	
	50	120
3	3	3
5	5	5

POZNÁMKA: Pro třídu 3 a 5 nejsou stanoveny chyby úhlu

Tabulka 3.3 - Dovolené chyby převodu pro měřící transformátor proudu (třídy 3 a 5) [10]

Třída přesnosti	Chyba převodu při jm. primárním proudu $\pm \varepsilon_1$ [%]	Chyba úhlu při jmenovitém primárním proudu $\pm \delta_1$ [' nebo cr]		Celková chyba při jmenovitém primárním nadproudu ε_c [%]
		[']	[cr]	
5 PR	± 1	± 60	$\pm 1,8$	5
10 PR	± 3	-	-	10

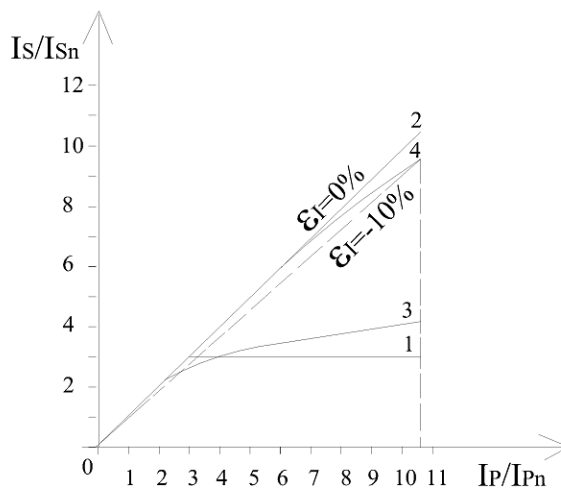
Tabulka 3.4 - Dovolené chyby převodu a úhlu pro jistící transformátory proudu třídy PR [10]

3.3.3.2. Přesnost v nadproudové oblasti

Nadproudová charakteristika je závislost sekundárního proudu na primárním proudu v nadproudové oblasti viz **obrázek 3.16**. Ideální nadproudová charakteristika přístrojového měřicího transformátoru proudu by probíhala po paprsku $\varepsilon_I = 0$ až do malého násobku (tří- až pětinásobku) jmenovitého primárního proudu a pak po přímce $I_S = \text{konst.}$ (viz průběh 1 v **obrázku 3.16**, skutečný průběh viz křivka 3 v **obrázku 3.16**), aby připojené měřicí přístroje byly chráněny před škodlivými účinky nadproudů v síti. Naopak u přístrojového jistícího transformátoru proudu by nadproudová charakteristika měla probíhat po paprsku $\varepsilon_I = 0$ až do nejvyšších hodnot primárního proudu, aby připojené jistící přístroje působily spolehlivě i při zkratech v rozvodně 110kV (ideální průběh viz křivka 2, reálný viz křivka 4 v **obrázku 3.16**).

Chování přístrojových transformátorů proudu v nadproudové oblasti charakterizuje nadproudové číslo FS. FS je poměr jmenovitého primárního nadproudu ke jmenovitému primárnímu proudu.

Nadproudové číslo si volí zákazník podle toho, zda bude přístrojový transformátor proudu měřicí nebo jistící. Nadproudové číslo je největší při $\cos\beta_C = 1$, tj. $\beta_C = 0$ a klesá s rostoucím úhlem β_C (klesajícím sekundárním účíníkem).



Obrázek 3.16 - Ideální (1,2) a skutečné (3,4) nadproudové charakteristiky přístrojového transformátoru proudu [12]

Pokud primární proud bude růst nade všechny meze (zkrat) dojde k přesycení feromagnetického obvodu a tím také k nárůstu chyby p5evodu a úhlu. Z tohoto důvodu je feromagnetický obvod zejména přístrojového jistícího transformátoru proudu vyroben z vysoce kvalitních legovaných a orientovaných plechů s příměsí niklu a křemíku. Tento materiál feromagnetického obvodu vykazuje značnou odolnost proti saturaci.

Saturace feromagnetického obvodu má vliv na frekvenční odezvu přístrojového transformátoru proudu. Saturace může vést k deformacím výstupního signálu přístrojového transformátoru proudu. Deformace signálu se vyskytuje vždy, když intenzita hlavního toku dosahuje oblasti saturace. Saturace feromagnetického obvodu může být iniciována zkratovým proudem, v extrémním případě i vyššími harmonickými (v případě feromagnetického obvodu sekundárního vinutí pro měření).

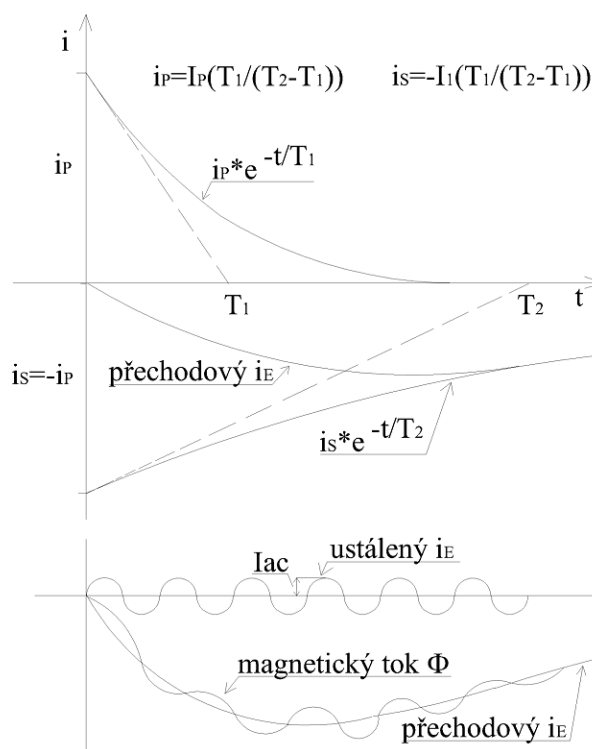
Zkratový proud I_P vstupující do přístrojového transformátoru proudu má malý magnetizační proud I_E a stejnosměrnou složku primárního proudu.

Amplitudy proudu primárního a sekundárního jsou v okamžiku $t=0s$ odvozeny z primárního proudu I_P podle rozdělení časových konstant T_1 a T_2 .

Výsledný magnetizační proud I_E je proměnný v čase a je dán rozdílem:

$$i_E = i_P - i_S \text{ [A]} \quad (3.13)$$

Na **obrázku 3.17** je zobrazen průběh primárního proudu, sekundárního proudu a magnetizačního proudu.



Obrázek 3.17 – Průběhy proudů a toků ve feromagnetickém obvodu při zkratu

Celkový magnetizační proud i_E budí magnetický tok Φ a má dvě složky:

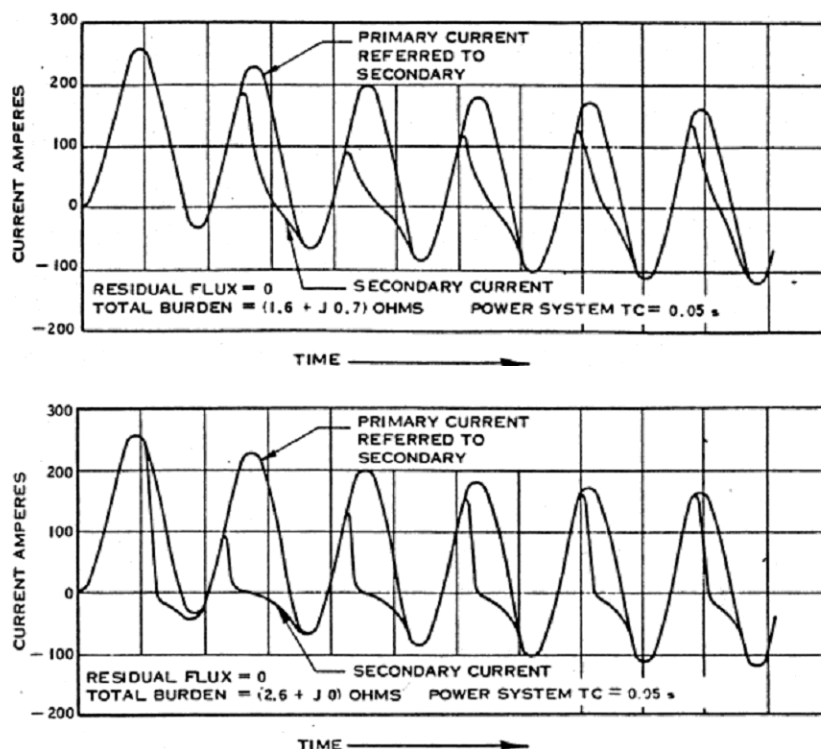
- Ustálení proud i_E (část střídavé složky poruchového proudu) indukuje tok Φ_{ac} .
- Přechodový proud i_E (stejnosměrná složka poruchového proudu způsobující chybu převodu) indukuje tok Φ_{tc} .

Změna přechodového toku Φ_{ic} je funkcí časových konstant primárního a sekundárního obvodu přístrojového transformátoru proudu. Konstanta primárního obvodu přístrojového transformátoru proudu je definována napájecím obvodem, ke kterému je přístrojový transformátor proudu připojen. Časová konstanta sekundárního obvodu přístrojového transformátoru proudu je definována:

- rozptylovou indukčností sekundárního vinutí přístrojového transformátoru proudu,
- odporem sekundárního vinutí přístrojového transformátoru proudu,
- impedancí břemene.

Rozptylová indukčnost sekundárního vinutí přístrojového transformátoru proudu může být obvykle zanedbána a odpor sekundárního vinutí přístrojového transformátoru proudu je obvykle spojen s impedancí zátěže do celkové impedance zátěže.

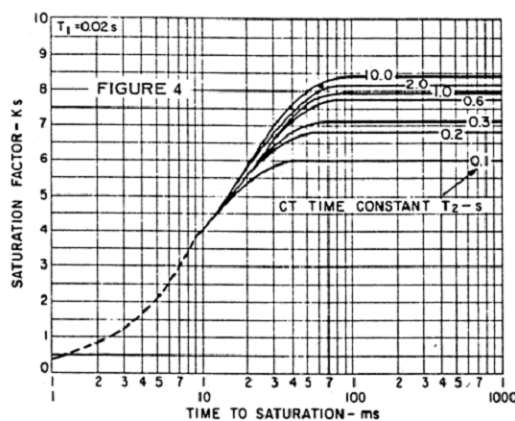
Závislost úrovně saturace na celkovém břemeni je ukázána na **obrázku 3.18**.



Obrázek 3.18 – Nahoře: průběh primárního a sekundárního proudu (nízká hodnota celkového břemene). Dole: průběh primárního a sekundárního proudu (vyšší hodnota celkového břemene) [13]

Na **obrázku 3.18** je vidět, že deformace sekundárního proudu začíná se zpožděním po začátku zkratu. **Obrázek 3.18** také ukazuje, že se zvyšující se celkovou impedancí zátěže je sekundární proud více deformovaný. Lze předpokládat, že u sekundárního vinutí pro měření, kde je impedance elektroměru Z_{EL} běžně kolem $10k\Omega$, bude deformace sekundárního proudu značně

zhoršená oproti *obrázku 3.18* (*obrázek 3.18* uvažuje malou odporovou zátěž jisticích obvodů v jednotkách Ω). Saturace v čase může být určena analyticky po zahrnutí parametrů napájecího systému. Na *obrázku 3.19* jsou zobrazeny obecné křivky, které mohou být použity pro přímou interpretaci saturace v čase.



Obrázek 3.19 – Křivky saturace [13]

Soubor křivek odpovídá časové konstantě primárního obvodu $T_1=0,02s$ a časové konstantě sekundárního obvodu T_2 v rozmezí hodnot od 0,1s do 10s. Průběh saturace je definován faktorem saturace K_s takto [13]:

$$K_S = \frac{V_X N_S}{I_P R_C} = \frac{\omega T_1 T_2}{T_1 - T_2} \left(e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) + 1 \quad (3.14)$$

- kde: V_X efektivní napětí saturace [V]
 N_S počet závitů sekundárního vinutí [závit]
 I_P amplituda primárního proudu [A]
 R_C celkový odpor zátěže (vnitřní + vnější)* [Ω]
 ω úhlová frekvence, rovna $2\pi f$ [rad]

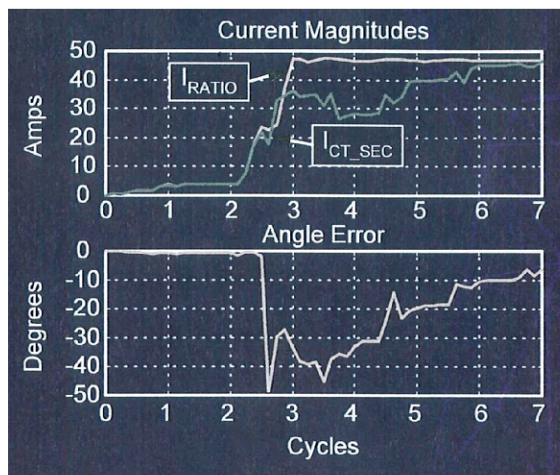
* Poznámka – platí pro sekundární vinutí pro jištění. U sekundárního vinutí pro měření je nutné R_C nahradit za Z_C , která bude induktivního nebo kapacitního charakteru podle typu elektroměru.

Ve *vzorci 3.14* je T_1 je závislé zejména na I_P a T_2 je rovno:

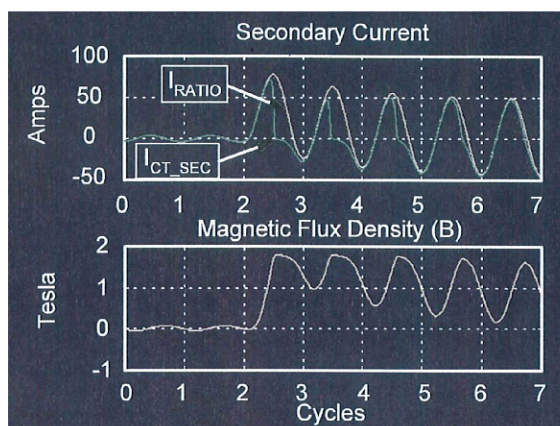
$$T_2 = \frac{Z_E}{\omega Z_C} \text{ [s]} \quad (3.15)$$

- kde: Z_E impedance magnetizační větve [Ω]
 Z_C celková impedance zátěže [Ω]

Na **obrázku 3.20** je zobrazena chyba převodu a úhlu při saturaci feromagnetického obvodu přístrojového transformátoru proudu. Na **obrázku 3.21** je zobrazena časová odezva přístrojového transformátoru proudu při saturaci feromagnetického obvodu a průběh sycení feromagnetického obvodu.



Obrázek 3.20 – Chyba převodu a úhlu při saturaci feromagnetického obvodu [9]



Obrázek 3.21 - Časová odezva přístrojového transformátoru proudu při saturaci feromagnetického obvodu a průběh sycení feromagn. obvodu [9]

Výrobci přístrojových transformátorů proudu se snaží, aby nedošlo k přesycení feromagnetického obvodu. To je možné pokud pro feromagnetický obvod zajistí:

- nízké hodnoty remanence,
- nízké hodnoty koercivity,
- vysokou permeabilitu.

Dosažení těchto parametrů je možné splnit feromagnetickým obvodem s úzkou a vysokou hysterezní smyčkou (opak hysterezní smyčky permanentního magnetu).

Pro přístrojové měřicí transformátory proudu není normou [10] stanovena maximální povolená chyba převodu a úhlu při zvýšení primárního proudu nad 120% proudu jmenovitého.

Představu o velikosti chyby převodu při několikanásobném nárůstu primárního proudu je možné shlédnout na **obrázku 3.16**. Je zřejmé, že přístrojové jisticí transformátory proudu dosahují výrazně nižších chyb převodu a úhlu v nadproudové oblasti, než přístrojové měřicí transformátory proudu, což je v souladu s jejich určením.

Chyba převodu a úhlu přístrojových měřicích transformátorů proudu je v okolí jmenovitého proudu až 5-ti násobně nižší než u jisticích.

U sekundárního vinutí přístrojového transformátoru proudu určeného pro ochrany je běžné udávat nadproudové číslo. Příklad užití nadproudového čísla při specifikaci přístrojového transformátoru proudu s izolačním napětím 123kV v rozvodně 110kV TNS 25kV, 50Hz:

Přístrojový transformátor proudu

Typ JOF 123

Izolační napětí 123kV

Převod / třída přesnosti 100//5/5A

vinutí 1: 30VA, třída přesnosti 0,2S, obch. měření

vinutí 2: 30VA, třída **5P20 (5P-třída přesnosti, při 20xIn nepřesáhne celková chyba převodu 5%)**

3.4. Princip přístrojového induktivního transformátoru napětí

V této kapitole jsou podrobně zkoumány faktory ovlivňující chybu převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí při sinusovém průběhu primárního napětí.

- Chyba napětí (převodu) – ε_U

Chyba je způsobená rozptylovou indukčností a ztrátami ve vinutí a způsobí, že skutečný převod není roven jmenovitému převodu.

- Chyba úhlu – δ_U

Fázový rozdíl mezi fázory primárního a sekundárního napětí; orientace fázorů primárního a sekundárního napětí je volena tak, že u ideálního transformátoru napětí je chyba úhlu nulová. Chyba úhlu se považuje za kladnou, jestliže fázor sekundárního napětí předchází fázor primárního napětí. Obvykle bývá vyjádřena v úhlových minutách nebo centiradiánech.

3.4.1. Charakteristika funkce

Přístrojové induktivní transformátory napětí s izolačním napětím 123kV v rozvodně 110kV TNS 25kV, 50Hz zajišťují vstupní analogové měření pro fakturační statické elektroměry a jištění.

Poměr počtu závitů primárního vinutí N_P a sekundárního vinutí N_S se rovná (při zanedbání chyby převodu) poměru primárního napětí U_P a sekundárního napětí U_S .

Jmenovitý převod je definován jako poměr jmenovitého primárního napětí k jmenovitému sekundárnímu napětí [14]:

$$K_n = \frac{U_{Pn}}{U_{Sn}} \quad [-] \quad (3.16)$$

Chyba převodu je definována poměrem [14]:

$$\varepsilon_U = \frac{K_n \cdot U_S - U_P}{U_P} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.17)$$

kde: K_N jmenovitý převod přístrojového indukčního transformátoru napětí [-]

U_P skutečné primární napětí [V]

U_S skutečné sekundární napětí odpovídající U_P za podmínek měření [V]

Přístrojový indukční transformátor napětí lze charakterizovat chodem transformátoru naprázdno. Průchozí impedance musí být co nejnižší, aby úbytky napětí na R_P , L_P , R_S , L_S které ovlivňují chybu převodu a úhlu byly co nejmenší.

Při nulovém vnějším břemeni $Z_Z = 0$ jsou sekundární svorky m, n zkratovány a nastává nebezpečný stav, kdy zkratový proud je omezen pouze odpory vinutí a rozptylovou reaktancí přístrojového transformátoru napětí. V tomto stavu dochází k proražení izolace mezi primárním a sekundárním vinutím vlivem průchodu zkratového proudu. S rostoucím břemenem klesá primární proud I_P pro, který platí:

$$I_P = \frac{U_P}{Z_Z} \quad [A] \quad (3.18)$$

Pro spotřebovaný výkon vnějším břemenem platí:

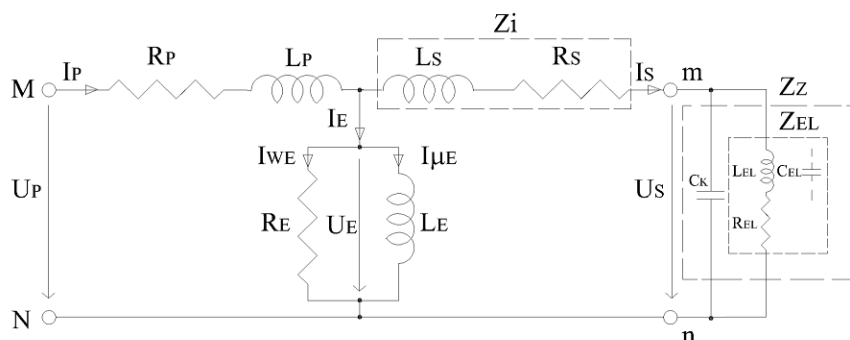
$$P_Z = U_P \cdot I_P = \frac{U_S^2}{Z_Z} \quad [W] \quad (3.19)$$

Vnější břemeno přístrojového indukčního transformátoru napětí tvoří měřicí, jistící přístroje a kabelové příводы k nim. V případě přístrojového indukčního měřicího transformátoru napětí tvoří břemeno vstupní impedance elektroměru Z_{EL} a k němu paralelně řazená kapacita přívodního kabelového vedení C_K . Sekundární účinník vnějšího břemene je označen $\cos \beta_Z$.

Celková vstupní impedance elektroměru obsahuje sériově řazené R_{EL} a L_{EL} (nebo sériově řazené R_{EL} a C_{EL}) podle typu elektroměru [11] viz **obrázek 3.11** a viz **vzorec 3.6**:

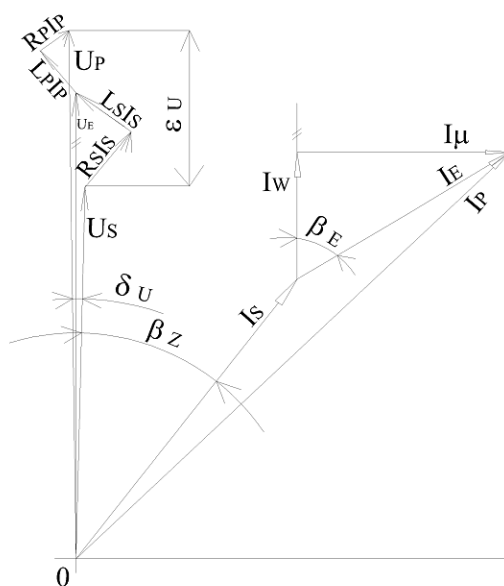
Pak pro celkovou impedanci vnějšího břemene, která obsahuje paralelní zapojení $|Z_{EL}|$ a kapacity přívodních kabeláží C_K mezi statickým elektroměrem a sekundárním měřicím vinutím (viz **obrázek 3.11**) platí - viz **vzorec 3.7**.

Na **obrázku 3.22** je náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí s uzavřeným feromagnetickým obvodem platné v okolí jmenovité frekvence 50Hz a za předpokladu $N_P = N_S$.



Obrázek 3.22 - Náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí platné v okolí jmenovité frekvence 50Hz a za předpokladu $N_P = N_S$

Magnetizační proud $\overline{I_E}$ je určen elektromotorickým napětím $\overline{U_E}$, které je o úbytek napětí $\overline{I_P} \cdot \sqrt{R_P^2 + (\omega L_P)^2}$ menší než primární svorkové napětí $\overline{U_P}$, a je zpožděn za elektromotorickým napětím $\overline{U_E}$ o úhel β_E . Vektorový diagram k náhradnímu schématu je na **obrázku 3.23**.



Obrázek 3.23 - Vektorový diagram veličin náhradního schématu přístrojového induktivního transformátoru napětí za předpokladu $N_P = N_S$

Výrobci se snaží o dosažení co nejnižší podélné impedance náhradního schématu. Hodnoty R_E a L_E mají vliv na přesnost převodu a úhlu jak v okolí jmenovité frekvence 50Hz tak při frekvencích vyšších.

3.4.2. Závislost chyby převodu a úhlu na vnějším břemeni, primárním napětí, sekundárním účinníku a kolísání jmenovité frekvence

3.4.2.1. Závislost chyby převodu a úhlu na vnějším břemeni

Vnější břemeno je impedance měřících a jisticích přístrojů připojených na sekundární svorky přístrojového indukčního transformátoru napětí včetně kapacity kabeláže.

Břemeno je obvykle vyjádřeno jako zdánlivý výkon ve VA spotřebovaný při stanoveném účinníku a při jmenovitém sekundárním napětí.

Jmenovité břemeno je hodnota zátěže, na které jsou založeny požadavky na předepsanou přesnost.

Jmenovitá zátěž je hodnota zátěže (ve VA při daném účinníku), kterou přístrojový indukční transformátor napětí přenáší do sekundárního obvodu při jmenovitém sekundárním napětí a připojeném jmenovitém břemeni.

Pokud bude břemeno mimo toleranci 25-100% zátěže jmenovité (požadavek normy [14]) bude narůstat chyba převodu i úhlu.

3.4.2.2. Závislost chyby převodu a úhlu na primárním napětí

Norma [14] požaduje, aby maximální hodnota chyby převodu a úhlu v *tabulce 3.5 a 3.6* byla dodržena při 80-120% napětí jmenovitého. Mimo toto rozmezí chyba převodu a úhlu roste.

3.4.2.3. Závislost chyby převodu a úhlu na sekundárním účinníku

Chyba převodu a úhlu přístrojového transformátoru napětí je ovlivněna účinníkem celkového vnějšího břemene $\cos \beta_Z$ a tedy i celkovým účinníkem břemene $\cos \beta_C$, který je součtem účinníku vnějšího a vnitřního břemene.

Při rostoucím β_Z a tedy i rostoucím β_C se zvyšuje $-\varepsilon_U$ a klesá $+\delta_U$. Při klesajícím β_Z a tedy i klesajícím β_C se snižuje $-\varepsilon_U$ a roste $+\delta_U$.

3.4.2.4. Závislost chyby převodu a úhlu na kolísání jmenovité frekvence

Norma [14] je platná pro přístrojové indukční transformátory napětí pracující na jmenovité frekvenci, která musí být v rozmezí 15Hz až 100Hz.

Například přístrojový induktivní transformátor napětí, s jmenovitou frekvencí 50Hz má garantované maximální meze chyby převodu a úhlu při frekvenci $\pm 2\text{Hz}$, což je povolené kolísání síťové frekvence.

Magnetizační větev je frekvenčně závislá. Hodnota R_E s rostoucí frekvencí roste a hodnota L_E s rostoucí frekvencí klesá.

Břemeno s konstantní indukčností bude měnit svoji reaktanci úměrně s frekvencí, čímž se bude měnit i účinník vnějšího břemene a tím i celkový účinník břemene.

Chyba převodu i úhlu bude se s rostoucí frekvencí zvyšovat.

3.4.3. Přesnost

3.4.3.1. Přesnost přístrojových induktivních měřících transformátorů napětí

U přístrojových induktivních měřících transformátorů napětí je třída přesnosti určena nejvyšší dovolenou chybou převodu a úhlu, vyjádřenou v procentech při jmenovitém napětí a jmenovité zátěži, předepsané pro příslušnou třídu přesnosti.

Chyba převodu a úhlu při jmenovité frekvenci nesmí překročit hodnoty v *tabulce 3.5* při jakémkoliv napětí mezi 80% a 120% jmenovitého napětí a se zátěží mezi 25% a 100% jmenovité zátěže při induktivním účinníku 0,8.

Třída přesnosti	Chyba převodu $\pm \epsilon_U$ [%]	Chyba úhlu $\pm \delta_U$ [' nebo cr]	
		[']	[cr]
0,1	0,1	5	0,15
0,2	0,2	10	0,3
0,5	0,5	20	0,6
1,0	1,0	40	1,2
3,0	3,0	nestanovena	nestanovena

Tabulka 3.5 - Dovolená chyba převodu a úhlu přístrojových induktivních měřících transformátorů napětí [14]

3.4.3.2. Přesnost přístrojových induktivních jistících transformátorů napětí

Třída přesnosti přístrojových induktivních jistících transformátorů napětí je určena nejvyšší dovolenou chybou převodu a úhlu, vyjádřenou v procentech, která je předepsána pro danou třídu přesnosti od 5% jmenovitého napětí do napětí odpovídajícího jmenovitému činiteli zvýšení napětí viz tabulka 2 v [14]. Údaj je doplněn písmenem P.

Chyba převodu a úhlu při jmenovité frekvenci nesmí překročit hodnoty uvedené v *tabulce 3.6* při 5% jmenovitého napětí a při jmenovitém napětí, násobeném činitelem zvýšení

napětí (1,2 ,1,5 nebo 1,9) se zátěžemi mezi 25% a 100% jmenovité zátěže při induktivním účinníku 0,8.

Třída přesnosti	Chyba převodu $\pm \varepsilon_U$ [%]	Chyba úhlu $\pm \delta_U$ [' nebo cr]	
		[']	[cr]
3P	3,0	120	3,5
6P	6,0	240	7,0

Tabulka 3.6 - Dovolena chyba převodu a úhlu pro přístrojové induktivní jistící transformátory napětí [14]

3.5. Princip přístrojového kapacitního transformátoru napětí

V této kapitole jsou podrobně zkoumány faktory ovlivňující chybu převodu a úhlu přístrojových kapacitních transformátorů napětí při sinusovém průběhu primárního napětí.

- Chyba napětí (převodu) – ε_U
chyba, kterou způsobuje přístrojový kapacitní transformátor napětí při měření napětí a jejímž důsledkem je, že skutečný převod není roven jmenovitému převodu.
- chybou úhlu – δ_U
fázový rozdíl mezi vektory primárního a sekundárního napětí.

3.5.1. Charakteristika funkce

Přístrojové kapacitní transformátory napětí obsahují kapacitní dělič, který zajišťuje snížení primárního napětí na napětí 4-10kV (rozdílné podle výrobce) a teprve poté je toto napětí dále sníženo středněnapěťovým transformátorem na napětí výstupní vhodné pro měřicí a jistící přístroje.

Přístrojové kapacitní transformátory napětí se používají zejména na napěťové hladině 110kV a výše, kvůli finanční výhodnosti oproti přístrojovým induktivním transformátorům napětí, která roste se zvyšující se napěťovou hladinou.

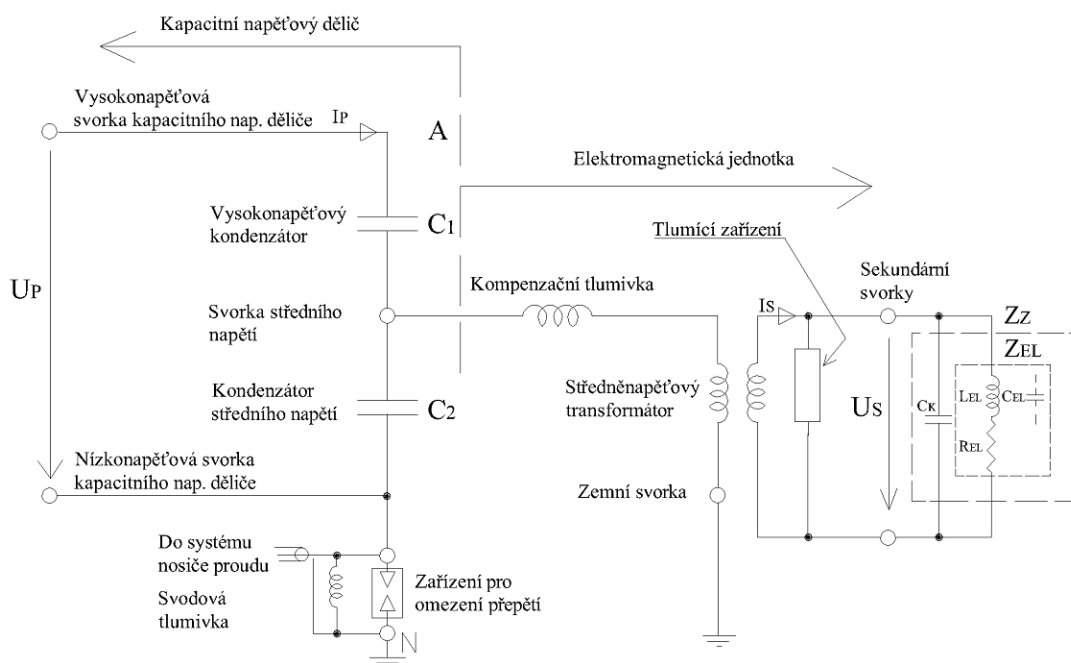
V rozvodnách 110kV TNS 25kV, 50Hz zatím nebyly instalovány. Jelikož jsou některé rozvodny 110kV, ale ve vlastnictví distributora elektrické energie, není jejich instalace v budoucnu vyloučena.

Fázový posun sekundárního napětí způsobený kapacitním děličem se vektorově sčítá s fázovým posunem opačného směru kompenzační tlumivky zapojené v sérii. Obvod je vyregulován tak, aby na jmenovité frekvenci sítě měl přístrojový kapacitní transformátor napětí

maximální přesnost. V případě spínacích nebo provozních přepětí však sériový LC obvod může začít kmitat. Proto jsou všechny přístrojové kapacitní transformátory napětí vybaveny obvodem pro potlačení ferorezonance (tlumící zařízení). Tento jev může přehřát elektromagnetickou jednotku nebo může vést k průrazu izolace.

Přístrojový kapacitní transformátor napětí je často doplňován svodičem přepětí, který se zapojuje buď paralelně k C_2 kapacitního děliče, nebo mezi nízkonapětovou svorku kapacitního děliče napětí a zem (viz **obrázek 3.24**). Cílem je ochránit primární vinutí středněnapětového transformátoru včetně měřicích a jisticích přístrojů na sekundární straně a obsluhy.

Přístrojový kapacitní transformátor napětí se skládá z kapacitního děliče a elektromagnetické jednotky viz **obrázek 3.24**.



Obrázek 3.24 – Náhradní schéma přístrojového kapacitního transformátoru napětí

platné v okolí jmenovité frekvence 50Hz a za předpokladu $N_P=N_S$ [15]

Primární část obsahuje dva kondenzátory C_1 a C_2 zapojené do série. Ve skutečnosti je každý z kondenzátorů složen z několika kondenzátorů menších hodnot zapojených v sérii. Středněnapětový transformátor převádí napětí z hladiny 4-10kV (různé podle výrobce) na sekundární napětí vhodné pro napájení měřicích přístrojů a ochran. Indukce kompenzační tlumivky L_C je volena tak, aby zajistila nulový fázový posun mezi U_P a U_S na základní harmonické. Hodnota L_C kompenzační tlumivky je vypočítána pro základní frekvenci sítě ze vztahu:

$$L_C = \frac{1}{(C_1 + C_2)(2\pi f_R)^2} \text{ [H]} \quad (3.20)$$

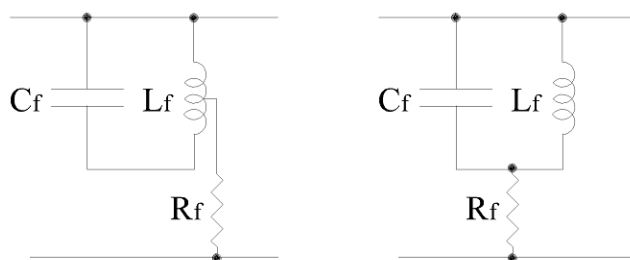
kde: f_R rezonanční kmitočet [Hz]

Ferorezonance je vyvolána přechodovými stavy v rozvodnách, kdy se u některých částí přístrojového kapacitního transformátoru napětí přesytí feromagnetické obvody (kompenzační tlumivky, středněnapěťový transformátor, případně indukční zátěže s nelineární charakteristikou). Podmínky usnadňující vznik ferorezonance, jsou malá vnější zátěž nebo zátěž induktivní, je-li její pracovní oblast blízko nasycené části magnetizační křivky.

Největší nebezpečí vzniku ferorezonance je při přerušení zkratu sekundárního obvodu nezatíženého přístrojového kapacitního transformátoru napětí. Podobný jev může vzniknout, je-li přístrojový kapacitní transformátor napětí vypnut a po krátké, případně i delší době, např. při opětovném zapínání, znovu připojen na síť. Oscilace pak způsobují nežádoucí přenos do ochranných relé a měřících přístrojů.

Pro zamezení vzniku ferorezonance se musí do obvodu přístrojového kapacitního transformátoru napětí vložit tlumící zařízení pro potlačení ferorezonance, které je nalazené na jmenovitou frekvenci 50Hz. Tlumící zařízení může být buď aktivní, nebo pasivní.

Příklad uspořádání aktivního tlumícího zařízení je na **obrázku 3.25 a)**. Simulační model aktivního tlumícího zařízení je ukázán na **obrázku 3.25 b)**. Tlumící odpor R_f je použit k zmírnění ferorezonančních oscilací.

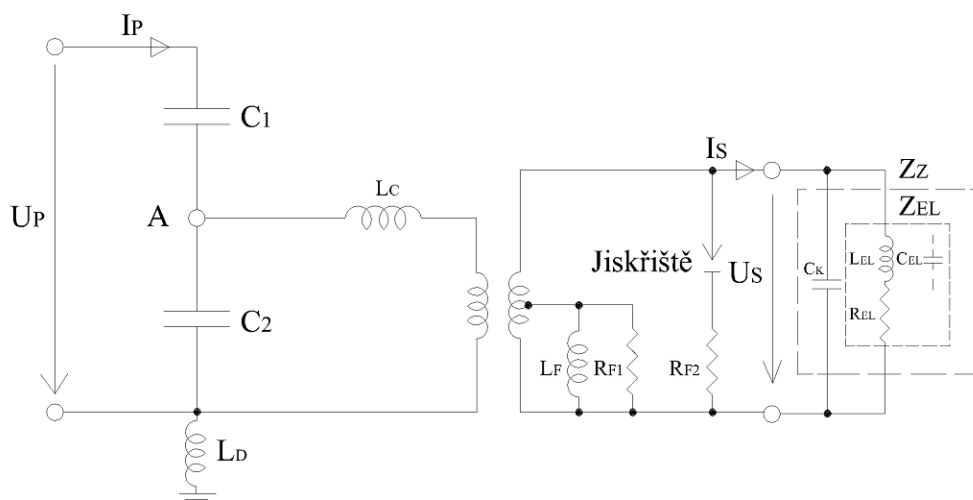


Obrázek 3.25 - a) zapojení aktivního tlumícího zařízení a **b)** simulační model aktivního tlumícího zařízení [16]

Indukčnost L_F a C_F aktivního tlumícího zařízení pro potlačení ferorezonance je naladěna tak, aby rezonovala na jmenovité frekvenci 50Hz. Tak je během normálního provozu impedance větve $L_F // C_F$ velmi vysoká a tlumící zařízení způsobuje zanedbatelný úbytek napětí.

Obvod pro potlačení ferorezonance může být i pasivní, přičemž obvod s pasivním tlumícím zařízením (viz **obrázek 3.26**) sestává z indukčnosti L_F a tlumícího odporu R_{F1} připojeného na hlavní odbočku sekundárního vinutí středněnapěťového transformátoru a

jiskřiště, které je v sérii s druhým tlumícím odporem R_{F2} . Za normálních podmínek je sekundární napětí středněnapěťového transformátoru napětí nedostatečné k překlenutí mezery jiskřiště a tím odpor R_{F2} nemá vliv na chování přístrojového kapacitního transformátoru napětí. Pokud nastane ferorezonance je mezera jiskřiště překlenuta a je připojen odpor R_{F2} , který ztlumí amplitudu oscilací. Pasivní tlumící zařízení pro potlačení ferorezonance má lepší frekvenční a časovou odezvu než aktivní tlumící zařízení [17].



Obrázek 3.26 – Náhradní schéma přístrojového kapacitního transformátoru napětí, s pasivním tlumícím zařízením, platné v okolí jmenovité frekvence 50Hz a za předpokladu $N_P=N_S$ [17]

Dělicí poměr K_{CR} je poměr napětí aplikovaného na kapacitní dělič ke střednímu napětí naprázdno. Tento poměr odpovídá podílu součtu kapacity kondenzátoru vysokonapěťové části a kondenzátoru části středního napětí děleného kapacitou vysokonapěťového kondenzátoru [15]:

$$K_{CR} = \frac{(C_1 + C_2)}{C_1} \quad [-] \quad (3.21)$$

Jmenovitý převod transformátoru [15]:

$$K_R = \frac{U_1}{U_2} \quad [-] \quad (3.22)$$

Výsledná kapacita kapacitního děliče:

$$C_R = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad [F] \quad (3.23)$$

Chyba převodu je definována [15]:

$$\varepsilon_U = \frac{K_R U_S - U_P}{U_P} \cdot 100 \quad [\%]$$

(3.24)

kde: K_R jmenovitý převod přístrojového kapacitního transformátoru napětí [-]

U_P skutečné primární napětí [V]

U_S skutečné sekundární napětí [V]

3.5.2. Závislost chyby převodu a úhlu na teplotním činiteli, vnějším břemeni, kolísání jmenovité frekvence a zadržování náboje

3.5.2.1. Závislost chyby převodu a úhlu na teplotním činiteli

Teplotní činitel změny kapacity se změnou teploty je u kondenzátorů s papírovou izolací v oleji definován takto [12]:

$$\Delta C_t = C_0 \frac{\alpha}{100} \Delta t \text{ [F]} \quad (3.25)$$

kde: $\alpha=0,04\%$ až $0,07\%$ na $1\text{ }^\circ\text{C}$

Změna okolní teploty způsobuje vlastní chybu převodu a úhlu kapacitního děliče a projevuje se hlavně při rozdílných teplotách jednotlivých částí děliče. Z tohoto důvodu bývají kondenzátory kapacitního děliče pro třídu přesnosti 0,2 v jednom plášti a s umělou cirkulací oleje, aby rozdíl teploty mezi jednotlivými díly byl co nejmenší.

3.5.2.2. Závislost chyby převodu a úhlu na vnějším břemeni

Chyba převodu a úhlu závisí na hodnotě a charakteru vnější zátěže, dělicím poměru kapacitního děliče a na činné složce průchozí impedance a nepřímo na příkonu kapacitního děliče.

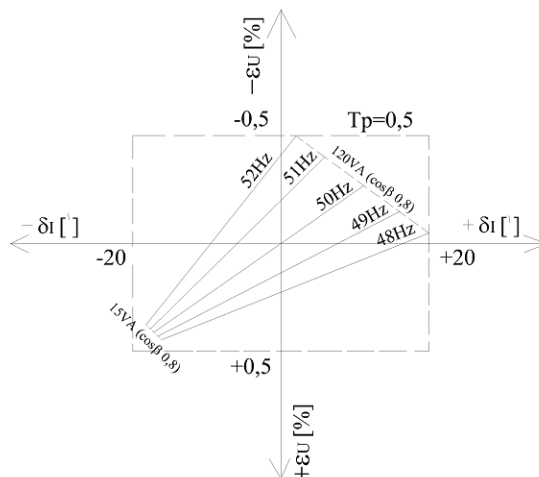
Čím je větší dělicí poměr kapacitního děliče, tím jsou chyby převodu a úhlu větší, proto je snaha volit co nejvyšší výstupní napětí kapacitního děliče.

3.5.2.3. Závislost chyby na kolísání jmenovité frekvence

Norma [15] je platná pro přístrojové kapacitní transformátory napětí pracující na jmenovité frekvenci, která musí být v rozmezí 15Hz až 100Hz.

Například přístrojový kapacitní transformátor napětí s jmenovitou frekvencí 50Hz má garantované maximální meze chyby převodu a úhlu při frekvenci $\pm 2\text{Hz}$, což je povolené kolísání síťové frekvence.

Chyba převodu a úhlu je u přístrojového kapacitního transformátoru napětí značně zhoršena již při kolísání síťové frekvence viz *obrázek 3.27*.



Obrázek 3.27 - Komplexní diagram chyby převodu a úhlu přístrojového kapacitního transformátoru napětí při kolísání frekvence sítě [12]

3.5.2.4. Závislost chyby převodu a úhlu na zadržování náboje

Jestliže vedení není záměrně uzemněno nebo vybíjeno přes zařízení s nízkou impedancí, které je k tomuto vedení připojeno, mohou náboje zůstat na takovém vedení po dobu několika dní [15]. Hladina náboje závisí na fázi napětí v okamžiku vypnutí. Nejhorší případ nastává, když napětí je ve své vrcholové hodnotě $\sqrt{2} \cdot U_P$, primární kondenzátor děliče C_1 zůstává nabit nábojem $q_1 = C_1 \cdot \sqrt{2} \cdot U_P$ zatímco sekundární kondenzátor C_2 je vybíjen přes paralelně připojenou elektromagnetickou jednotku. Při opětovném zapnutí vedení je C_2 znovu nabíjeno napětím [15]:

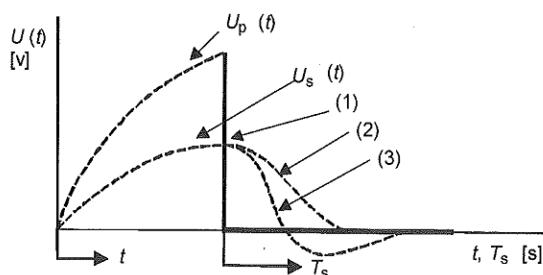
$$U_{C_2}(t) = \frac{-q_1}{(C_1 + C_2)} = -\sqrt{2} \cdot \frac{U_P C_1}{(C_1 + C_2)} \sim -\sqrt{2} \cdot U_P (C_1 + C_2) \text{ [V]} \quad (3.26)$$

Toto napětí exponenciálně klesá s časovou konstantou založenou na elektromagnetické jednotce a je superponováno na sinusový signál a má za následek velmi významnou chybu [15].

3.5.3. Odezva při přepětí

Odezva přístrojového kapacitního transformátoru napětí při přepětí je charakteristická poměrem sekundárního napětí $U_S(t)$ k vrcholové hodnotě sekundárního napětí $\sqrt{2} \cdot U_S$, před aplikací zkratu primárního obvodu po stanovenou dobu T_S po zkratování primárního obvodu.

Průběh sekundárního napětí $U_S = U_S(t)$ po zkratování primárního napětí $U_P = U_P(t)$, je na **obrázku 3.28**:



Legenda

- 1 Zkrat $U_p(t)$
- 2 Aperiodické tlumení $U_s(t)$
- 3 Periodické tlumení $U_s(t)$

Obrázek 3.28 - Odezva přístrojového kapacitního transformátoru napětí na přepětí [15]

Po zkratu mezi svorkou A vysokého napětí a nízkonapěťovou svorkou N spojenou se zemí, se musí přepětí na sekundární straně přístrojového kapacitního transformátoru napětí utlumit ve stanovenou dobu T_s na stanovenou hodnotu vrcholu napětí před aplikací zkratu (viz **obrázek 3.28**).

Charakteristickou veličinou přechodové charakteristiky je poměr sekundárního napětí $U_s(t)$ (ve stanoveném čase T_s po zkratování primárního obvodu) k vrcholové hodnotě sekundárního napětí $\sqrt{2} \cdot U_S$ před zkratováním primárního obvodu. V **tabulce 3.7** jsou uvedeny normalizované hodnoty tříd přechodových charakteristik.

Doba T_s [s]	Poměr $\frac{ U_s(t) }{\sqrt{2} \cdot U_S} \cdot 100\%$		
	Třídy		
	3PT1 6PT1	3PT2 6PT2	3PT3 6PT3
10×10^{-3}	-	≤ 25	≤ 4
20×10^{-3}	≤ 10	≤ 10	≤ 2
40×10^{-3}	<10	≤ 2	≤ 2
60×10^{-3}	<10	$\leq 0,6$	≤ 2
90×10^{-3}	<10	$\leq 0,2$	≤ 2

Tabulka 3.7 - Normalizované hodnoty tříd přechodových charakteristik [15]

3.5.4. Přesnost

3.5.4.1. Přesnost přístrojových kapacitních měřicích transformátorů napětí

Chyba převodu a úhlu nesmí překročit hodnoty uvedené v **tabulce 3.8** pro příslušnou třídu přesnosti při libovolné teplotě a kmitočtu v referenčních rozsazích a s břemeny od 0% do

100% jmenovité hodnoty pro jmenovité břemeno rozsahu I (viz *tabulka 3.9*) nebo s břemeny od 25% do 100% jmenovité hodnoty pro jmenovité břemeno rozsahu II (viz *tabulka 3.9*).

Třída přesnosti	Chyba převodu $\pm \epsilon_U$ [%]	Chyba úhlu $\pm \delta_U$ [' nebo cr]	
		[']	[cr]
0,2	0,2	10	0,3
0,5	0,5	20	0,6
1,0	2,0	40	1,2
3,0	3,0	nestanovena	nestanovena

Tabulka 3.8 - Meze chyb převodu a úhlu pro přístrojové kapacitní měřící transf. napětí [15]

Rozsah břemene	Přednostní hodnoty jmenovité zátěže [VA]	Zkušební hodnoty jmenovité zátěže [%]
I	1,0 2,5 5	0 a 100
II	10 25 50 100	25 a 100

Tabulka 3.9 - Rozsahy břemene pro zkoušky břemene [15]

3.5.4.2. Přesnost přístrojových kapacitních jistících transformátorů napětí

Chyba převodu a úhlu nesmí překročit hodnoty uvedené v *tabulce 3.10* pro příslušnou třídu přesnosti při 2% a 5% jmenovitého napětí a jmenovitém napětí násobeným jmenovitým činitelem zvýšení napětí (1,2 , 1,5 nebo 1,9) a při jmenovitém kmitočtu s břemeny od 0% do 100% jmenovité hodnoty pro břemena pro rozsah břemen I (viz *tabulka 3.9*) nebo s břemeny od 25% do 100% jmenovité hodnoty pro břemena rozsahu II (viz *tabulka 3.9*).

		Procentní chyba převodu při procentech jmenovitého napětí $\pm \epsilon_U$ [%]				Chyba úhlu v procentech jmen. napětí $\pm \delta_U$ [' nebo cr]							
						[']				[cr]			
Třída přesnosti	Procento jmenovitého napětí [%]	2	5	100	X	2	5	100	X	2	5	100	X
3P		6,0	3,0	3,0	3,0	240	120	120	120	7,0	3,5	3,5	3,5
6P		12,0	6,0	6,0	6,0	480	240	240	240	14,0	7,0	7,0	7,0

Tabulka 3.10 - Meze chyb převodu a úhlu pro přístrojové kapacitní jistící transf. napětí [15]

4. Frekvenční závislost chyby převodu a úhlu přístrojových transformátorů v rozvodně 110kV TNS 25kV, 50Hz

4.1. Přístrojové transformátory obecně

V *kapitole 2* byla popsána povaha odběru TNS 25kV, 50Hz, který je nejen nesymetrický vzhledem k třífázové distribuční soustavě 110kV, ale také deformovaný vyššími proudovými harmonickými, které na impedanci distribuční soustavy 110kV způsobují nežádoucí tepelné ztráty. K snížení velikosti těchto proudových harmonických je v přípojovacím bodě TNS 25kV, 50Hz instalováno FKZ, které odfiltrává z trakčního odběru 3. a 5. harmonickou. Ostatní liché řady harmonických jsou v trakčním odběru přítomny v podstatně menší míře a přenáší se trakčním transformátorem do distribuční soustavy 110kV, kde způsobují již zanedbatelné tepelné ztráty. Úrovně těchto harmonických nepřesahují povolenou mez stanovenou distributorem elektrické energie v přípojovacích podmínkách. Harmonickými deformované průběhy napětí a proudu obsahují jak složku základní harmonické, tak i složky vyšších harmonických.

V této kapitole bude proveden rozbor frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojových transformátorů v rozvodně 110kV TNS 25kV, 50Hz. Přístrojové transformátory zajišťují v rozvodně 110kV TNS 25kV, 50Hz analogové měření napětí a proudu pro statické elektroměry (fakturační měření) a ochrany.

Zkoumání frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojových transformátorů bude provedeno do 100-té harmonické (5kHz). Distributor elektrické energie stanovuje v přípojovacích podmínkách maximální přípustné meze do 19-té harmonické, pak je již stanovena pouze maximální hodnota THD, která započítává složky harmonických do řádu 40 (viz *vzorec 2.2*). Jelikož od 40-té harmonické nejsou procentní podíly harmonických k základní harmonické sledovány distributorem elektrické energie, je sledované frekvenční pásmo zcela dostatečné.

Výzkum frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojových transformátorů s izolačním napětím 27,5kV v rozvodně 25kV při nesinusových průbězích napětí a proudu nebude předmětem této práce, protože měření na této napěťové hladině je informativní a je využito zejména pro informativní zobrazování měřeného napětí a proudu obsluze a pro potřeby ochrany rozvodny 25kV. Rozbor frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu na této napěťové hladině je popsán v literatuře [18, 19, 11].

Všechna náhradní schémata přístrojových transformátorů odvozená v *kapitole 3* jsou platná v okolí jmenovité frekvence 50Hz a jedná se o náhradní schémata se soustředěnými parametry. Neuvažoval jsem tedy obecně platné náhradní schéma přístrojového transformátoru s rozprostřenými parametry. Náhradní schéma přístrojového transformátoru s rozprostřenými parametry uvažuje i vliv kapacit mezi vinutími a kostrou, mezi vinutími navzájem a vodivostí. Tyto prvky náhradního schématu s rozprostřenými parametry nemají v okolí jmenovité frekvence vliv na chybu převodu a úhlu přístrojových transformátorů a je možné je zanedbat [20].

Při zkoumání frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojových transformátorů při měření na vyšších harmonických je však nutné přístrojový transformátor nahradit náhradním schématem s rozprostřenými parametry. Jelikož se jedná o velmi složitý obvod, kdy se vinutí primární a sekundární považuje za dlouhé vedení, u kterého je nutné zohlednit přídavný vliv kapacit a vodivostí, přistupuje se k zjednodušení. Do náhradního schématu se soustředěnými parametry se doplňují pouze kapacity mezi vinutími, mezi vinutími a kostrou. Toto zjednodušení bylo použito a následné simulace prokázaly, že i přes toto zjednodušení dává takto doplněné náhradní schéma se soustředěnými parametry velice dobrý model k výzkumu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojového transformátoru.

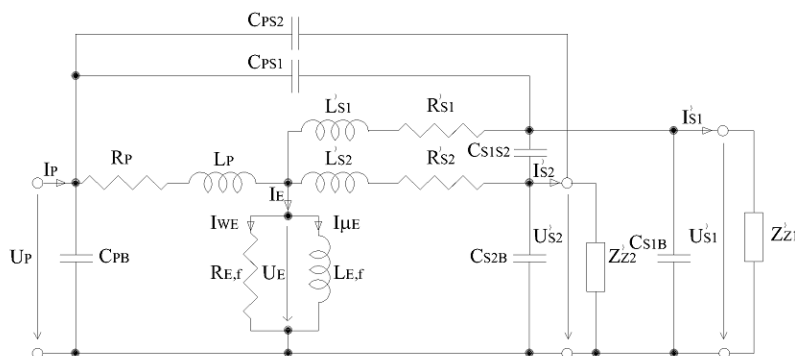
Zjednodušení v tomto rozsahu bylo použito v literatuře [18, 19, 21, 22, 23] pro výzkum frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojových transformátorů napětí s izolačním napětím 7,2 – 27,5kV. Literatura [24,25] pak použila toto zjednodušení i pro výzkum frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojových transformátorů v rozvodně 110kV.

Na *obrázku 3.7* je popsáno zjednodušené náhradní schéma přístrojového transformátoru s uzavřeným feromagnetickým obvodem platné v okolí jmenovité frekvence 50Hz a za předpokladu $N_P = N_S$. Rovnost závitů primárního a sekundárního vinutí byla zvolena kvůli zjednodušení, aby se při odvozování vztahů nemusel uvažovat převod.

Jelikož u reálného přístrojového transformátoru není N_P rovno N_S , je nutné přepočítat skutečné hodnoty napětí, proudů, odporů a indukčností ze sekundárního vinutí na primární na myšlené hodnoty, které přísluší převodu 1. Přepočítané hodnoty označujeme čárkou a platí pro ně:

$$U'_S = \frac{N_P}{N_S} \cdot U_S \text{ [V]}; \quad I'_S = \frac{N_S}{N_P} \cdot I_S \text{ [A]}; \quad R'_S = R_S \cdot \left(\frac{N_P}{N_S}\right)^2 \text{ [\Omega]};$$
$$L'_S = L_S \cdot \left(\frac{N_P}{N_S}\right)^2 \text{ [H]}; \quad C'_S = C_S \cdot \left(\frac{N_S}{N_P}\right)^2 \text{ [F]} \quad (4.1)$$

Jelikož přístrojové transformátory s izolačním napětím 123kV v rozvodně 110kV mají většinou dvě sekundární vinutí, je toto v náhradním schématu přístrojového transformátoru platném pro frekvence do 5kHz respektováno. První sekundární vinutí má požadovanou větší přesnost převodu a je určeno pro fakturační měření. Druhé sekundární vinutí má menší požadovanou přesnost a je určeno pro jistění (ochrany). Na **obrázku 4.1.** je náhradní schéma přístrojového transformátoru s dvěma sekundárními vinutími platné pro frekvence do 5kHz při respektování převodu.



Obrázek 4.1- Náhradní schéma přístrojového transformátoru s dvěma sekundárními vinutími platné pro frekvence do 5kHz při respektování převodu

- kde: C_{PB} kapacita mezi primárním vinutím (P) a kostrou (B) [F]
 C_{PS1} kapacita mezi primárním vinutím (P) a prvním sek. vinutím (S1) [F]
 C_{PS2} kapacita mezi primárním vinutím (P) a druhým sek. vinutím (S2) [F]
 C_{S1B} kapacita mezi prvním sekundárním vinutím (S1) a kostrou (B) [F]
 C_{S2B} kapacita mezi druhým sekundárním vinutím (S2) a kostrou (B) [F]
 C_{S1S2} kapacita mezi prvním sekundárním vinutím (S1) a druhým sekundárním vinutím (S2) [F]
 U_P primární napětí [V]
 I_P primární proud [A]
 R_P činný odpor primárního vinutí [Ω]
 L_P rozptylová indukčnost primárního vinutí [H]
 U_E napětí indukované v magnetizační větvi [V]
 I_E budící proud tekoucí magnetizační větvi [A]
 I_{WE} celkový proud kryjící ztráty v železe spojky a jádra [A]
 $I_{\mu E}$ celkový magnetizační proud spojky a jádra [A]
 $R_{E,f}$ odpor reprezentující ztráty hysterezní a vířivé ve spojce a jádře, frekvenčně závislý prvek [18] [Ω]
 $L_{E,f}$ magnetizační indukčnost spojky a jádra, frekvenčně závislý prvek [18] [H]

L'_{S1}	rozptylová indukčnost prvního sekundárního vinutí přepočítaná na primární stranu [H]
R'_{S1}	činný odpor prvního sek. vinutí přepočítaný na primární stranu [Ω]
U'_{S1}	sekundární napětí prvního sek. vinutí přepočítané na primární stranu [V]
I'_{S1}	sekundární proud prvního sek. vinutí přepočítaný na primární stranu [A]
L'_{S2}	rozptylová indukčnost druhého sek. vinutí přepočítaná na prim. stranu [H]
R'_{S2}	činný odpor druhého sek. vinutí přepočítaný na primární stranu [Ω]
U'_{S2}	sekundární napětí druhého sek. vinutí přepočítané na primární stranu [V]
I'_{S2}	sekundární proud druhého sek. vinutí přepočítaný na primární stranu [A]
Z_Z'	vnější břemeno přístrojového transformátoru přepočítané na primární stranu [Ω]

4.2. Vnější břemeno přístrojového transformátoru

Vnější břemeno sekundárních vinutí přístrojového transformátoru je tvořena statickými elektroměry a ochranami.

Vnější zátěž druhého sekundárního vinutí pro jistění je možné uvažovat o celkové impedanci $Z_{Z2} = 1-10\Omega$ [26]. K této impedanci je nutné přičíst paralelně řazenou kapacitu přívodní kabeláže.

Vnější břemeno sekundárního vinutí určeného pro fakturační měření tvoří vstupní impedance statického elektroměru a k němu paralelně připojená kapacita kabelového vedení od přístrojového transformátoru k statickému elektroměru.

Vstupní impedance statického elektroměru byla v literatuře [11] odvozena z firemních materiálů výrobců statických elektroměrů viz *tabulka 4.1 a 4.2* takto:

Výrobce statického elektroměru	Typ	Spotřeba energie		Napětí	Charakter zátěže
		zdánlivý	činný		
Moeller	KWZ-3PHx-xxx	7,7 VA	0,7 W	230 V	kapacitní
ZPA	ZETA 310.1.D	8,0 VA	0,7 W	230 V	indukční
Landys + Gyr	ZMD 400AT/CT	1,7 VA	0,7 W	110 V	indukční

Tabulka 4.1 - Přehled vlastností několika typů statických elektroměrů pro nepřímé měření [11]

Typ statického elektroměru	Impedance Z [Ω] (50Hz)	Reálná složka R_Z [Ω]	Imaginární složka	
			L_Z [H]	C_Z [nF]
KWZ-3PHx-xxx	6870	625	-	465
ZETA 310.1.D	6613	579	21,0	-
ZMD 400AT/CT	7117	2930	20,6	-

Tabulka 4.2 – Přehled jednotlivých prvků impedance [11]

K výsledné celkové impedanci vstupní zátěže statického elektroměru (*viz rovnice 3.6*) je nutné přidat paralelně řazenou kapacitu přívodní kabeláže (*viz rovnice 3.7*).

Vzdálenost mezi rozvodnou 110kV TNS 25kV, 50Hz, kde jsou přístrojové transformátory umístěny, a statickým elektroměrem lze dělit na dva případy:

- v rozvodně 110kV je domek měření a ochran – délka kabeláží je do 30m,
- v rozvodně 110kV není domek měření a ochran – délka kabeláží je do 100m.

Pro kabeláže od přístrojových transformátorů k statickým elektroměrům se používají zejména nestíněné kabely, jelikož dodavatel elektrické energie nepožaduje stínění kabelů. Nestíněné kabely nemají přesně definovanou kapacitu ve vztahu ke své délce. Vzhledem k tomu, že kabel není stíněn, bude kapacita kabelu podstatně ovlivněna parazitními kapacitami souběžných vedení.

Pro simulace bude měněna kapacita kabelového vedení od 0,5 μ F do 1,5 μ F, což pokryje široký rozsah případů délky kabeláží mezi přístrojovým transformátorem a statickým elektroměrem v rozvodnách 110kV TNS 25kV, 50Hz.

4.3. Přístrojový transformátor proudu

4.3.1. Náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu

Pro výzkum frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojového transformátoru proudu do 100-té harmonické je nutné v náhradním schématu přístrojového transformátoru proudu uvažovat v souladu s *kapitolou 4.1* vliv kapacit mezi vinutími a mezi vinutími a kostrou.

Jelikož se mi nepodařilo realizovat měření na přístrojovém transformátoru proudu s izolačním napětím 123kV, oslovil jsem firmu Pfiffner (výrobce přístrojových transformátorů) s žádostí o poskytnutí hodnot kapacit mezi vinutími a mezi vinutími a kostrou. Ostatní prvky náhradního schématu jsem odvodil z měřících protokolů firmy Pfiffner. Hodnoty kapacit mezi vinutími a mezi vinutími a kostrou, jejichž vliv na chybu převodu a úhlu stoupá se zvyšující se frekvencí, však výrobce neměl k dispozici, protože se v souladu s požadavky normy [10] zabývá pouze výzkumem chyby převodu a úhlu na jmenovité frekvenci.

Proto jsem využil k získání náhradního schématu literaturu. Z literatury [21] jsem získal náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu platné pro frekvence do 5kHz. Přístrojový transformátor proudu měl tyto parametry:

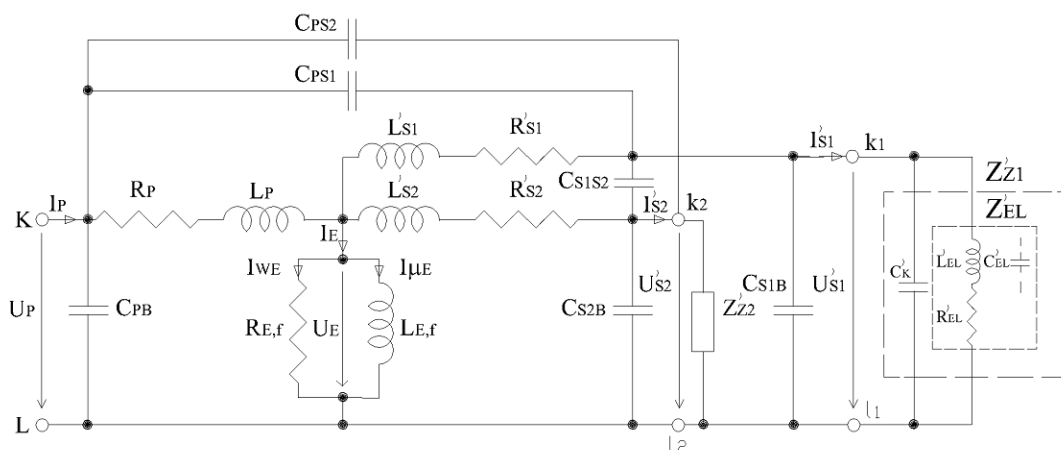
- 30/5A, izolační napětí 27,5kV, zátěž 15VA [21].

Později se mi podařilo získat v literatuře [24] další náhradní schéma, přístrojového transformátoru proudu používaného v rozvodnách 110kV a toto schéma je platné pro frekvence do 5kHz. Přístrojový transformátor proudu, který byl předmětem výzkumu má tyto parametry:

- 200//5/5/5A
- Vinutí 1 – Tp 0,5 (fakturační měření), 60VA, FS<3
- Vinutí 2 – Tp 0,5 (fakturační měření), 60VA, FS<3
- Vinutí 3 – Tp 1 (jištění), 60VA, FS<10

Zdroj [24] uvádí i hodnoty kapacit mezi vinutími a mezi vinutími a kostrou a hodnoty prvků náhradního schématu odvozených z měření naprázdno a nakrátko. Bohužel autor předpokládá frekvenční nezávislost hodnot R_E a L_E , což je v rozporu s výsledky výzkumu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojového transformátoru autorů [18, 19]. Náhradní schéma na **obrázku 4.2** toto zjednodušení nerespektuje.

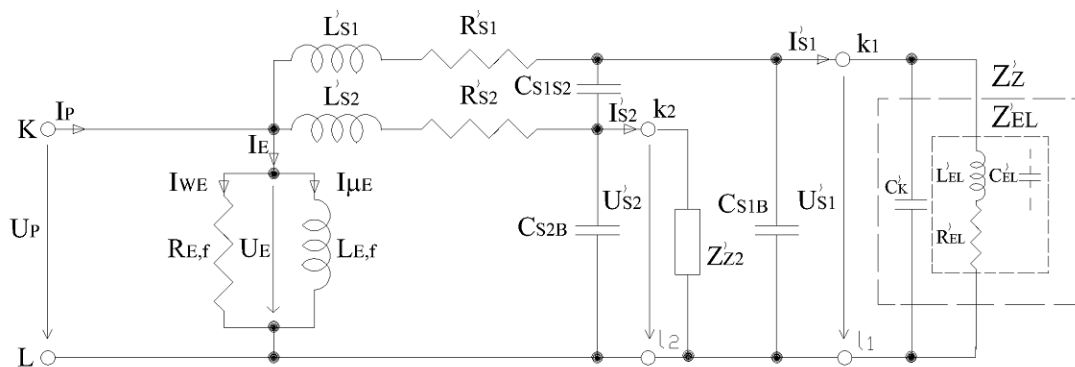
Náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu s dvěma sekundárními vinutími platné pro frekvence do 5kHz je na **obrázku 4.2**.



Obrázek 4.2 - Úplné náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu s dvěma sekundárními vinutími platné pro frekvence do 5kHz [24]

Jelikož primární vinutí přístrojového transformátoru proudu je složeno z jednoho, až tří tyčových závitů je možné v náhradním schématu na **obrázku 4.2** zanedbat prvky R_P , L_P , C_{PB} , C_{PS1} , C_{PS2} . Zjednodušené náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu je na **obrázku 4.3** a je v souladu s literaturou [21] a s literaturou [24], kde byly hodnoty R_P , L_P změřeny takto:

$$R_P = 0,0055\Omega ; L_P = 0,0251\text{mH} \quad (4.2)$$



Obrázek 4.3 - Zjednodušené náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu platné pro frekvence do 5kHz

Literatura [21] zkoumající frekvenční závislost chyby převodu a úhlu přístrojového transformátoru proudu toto schéma dále zjednodušuje, jelikož naměřené hodnoty R_{S1} , R_{S2} , L_{S1} , L_{S2} jsou zanedbatelně malé:

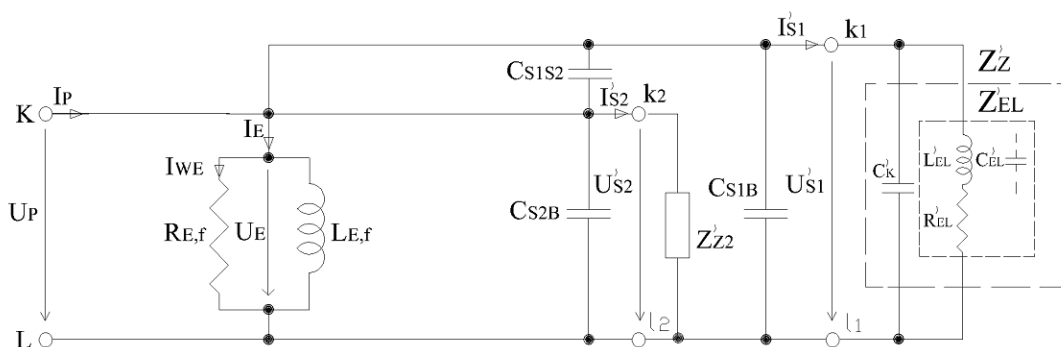
$$R_{S1} = R_{S2} = 0,33\Omega ; L_{S1} = L_{S2} \approx 0H \quad (4.3)$$

Tento závěr je částečně v souladu s literaturou [24] kde byly změřeny hodnoty těchto prvků takto:

$$R_{S1} = 0,45\Omega ; R_{S3} = 4,93\Omega ; L_{S1} = 6,4979mH ; L_{S3} = 20,6082mH \quad (4.4)$$

Z rovnice 4.4 je zřejmé, že hodnoty náhradních prvků sekundárního vinutí pro ochrany s vyšším číslem FS (např. >10) mají tyto prvky vyšší hodnotu. Vzhledem k hodnotám R_E a L_E je však možné je zanebat. Naměřené hodnoty R_E a L_E [24]:

$$R_{E1} = 120,32\Omega ; R_{E3} = 373,45\Omega ; L_{E1} = 2,2728H ; L_{E3} = 5,1550H \quad (4.5)$$



Obrázek 4.4 - Zjednodušené náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu platné pro frekvence do 5kHz

Ze zjednodušeného schématu přístrojového transformátoru proudu je zřejmé, že největší vliv na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu přístrojového transformátoru proudu má magnetizační větev, která je složena z paralelní kombinace $R_{E,f}$ a $L_{E,f}$. Přičemž podle zdroje [18]:

$$L_{E,f} = \frac{L_E}{\sqrt{f}} \text{ [H]} ; R_{E,f} = R_E \cdot \sqrt{f} \text{ [\Omega]} \quad (4.6)$$

Se zvyšující se frekvencí tedy roste hodnota $R_{E,f}$ a snižuje se hodnota $L_{E,f}$.

4.3.2. Výzkum vlivu prvků náhradního schématu přístrojového transformátoru proudu na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu

4.3.2.1. Vliv prvků $R_{E,f}$ a $L_{E,f}$ na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu

Prvky magnetizační větve jsou frekvenčně závislé. Podle *rovnice 4.6* bude se vzrůstající frekvencí růst $R_{E,f}$ a klesat $L_{E,f}$.

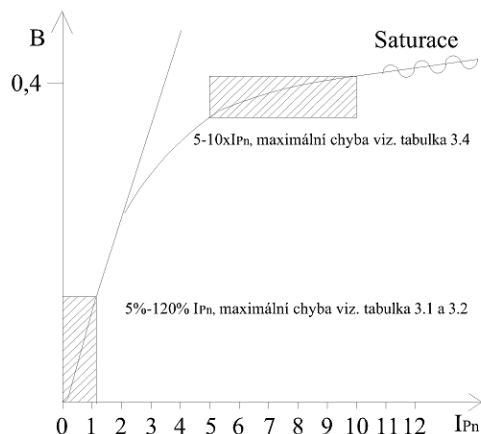
Porovnáme-li, ale hodnoty R_E , L_E přístrojového transformátoru proudu viz *vzorec 4.5* s naměřenými hodnotami R_E , L_E přístrojového transformátoru napětí [25]:

$$L_E=77,333\text{H} ; R_E=29,12\text{k}\Omega \quad (4.7)$$

lze stanovit, že zvyšující se frekvence nezpůsobí u přístrojového transformátoru proudu významnou chybu převodu a úhlu.

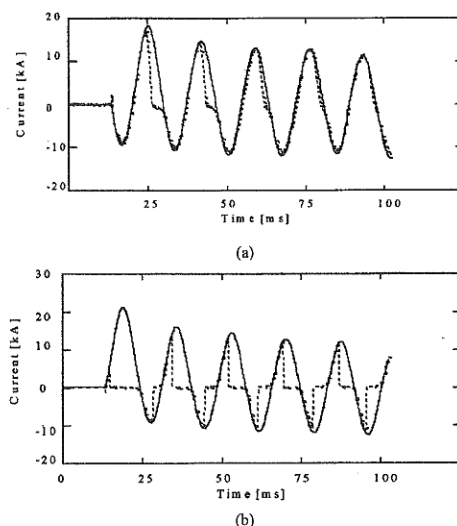
Významná chyba převodu a úhlu by se dala očekávat, pokud by došlo k přesycení feromagnetického obvodu přístrojového transformátoru proudu. Vzhledem k maximálním povoleným mezím napěťových (proudových) harmonických v připojovacím bodě TNS 25kV, 50Hz je však zcela vyloučené, aby tak malé procentní hodnoty základní harmonické zapříčinily přesycení feromagnetického obvodu přístrojového transformátoru proudu. Přitom pokud není feromagnetický obvod přístrojového transformátoru proudu přesycen, lze předpokládat frekvenční nezávislost chyby převodu a úhlu až do frekvence 50kHz [21], 16kHz [24].

K přesycení feromagnetického obvodu může dojít při několikanásobném nárůstu primárního proudu (cca. $4 \times I_{Pn}$ pro feromagnetický obvod sekundárního vinutí pro měření a ca. $10-15 \times I_{Pn}$ pro feromagnetický obvod sekundárního vinutí pro jištění (viz. *obrázek 4.5*). Pokud je dosažena mez saturace feromagnetického obvodu, je sekundární proud značně deformován.



Obrázek 4.5 – Průběh sycení feromagnetického obvodu přístrojového transformátoru.
proudu

Pokud by se měla sledovat frekvenční závislost chyby převodu a úhlu přístrojového transformátoru proudu ve frekvenčním pásmu do 5kHz a současně vliv přesycení feromagnetického obvodu na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu, bylo by nutné v modelu přístrojového transformátoru proudu zohlednit vždy parametry feromagnetického obvodu konkrétního přístrojového transformátoru proudu, aby získané průběhy odpovídaly skutečnosti. Na **obrázku 4.6** je příklad výstupu simulace průběhu sekundárního proudu přístrojového transformátoru proudu při zkratu na primárním vinutí bez zahrnutí remanence feromagnetického obvodu do simulačního modelu a se zahrnutím remanence feromagnetického obvodu do simulačního modelu.



Obrázek 4.6 – Průběh sekundárního proudu při zkratu na primárním vinutí: **a)** výsledek simulace bez zahrnutí remanence feromagnetického obvodu do modelu **b)** výsledek simulace se zahrnutím remanence feromagnetického obvodu do modelu [16]

4.3.2.2. Vliv kapacit mezi vinutími C_{S1S2} a kapacit proti zemi C_{S1B} a C_{S2B} na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu

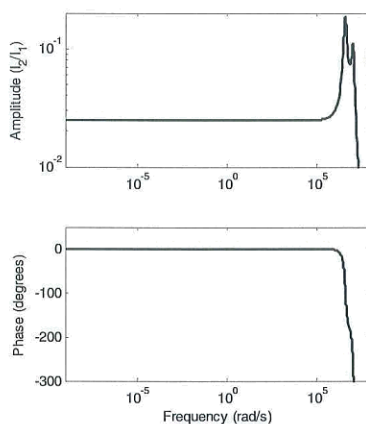
Se zvyšující se frekvencí roste vliv kapacit mezi vinutími a mezi vinutími a kostrou na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu. U přístrojových transformátorů proudu však pro sledované frekvenční pásmo do 5kHz nemají tyto kapacity významný vliv na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu. Dokladem je *obrázek 4.8* [24] a *obrázek 4.9* [21] v kapitole 4.3.3, který potvrzuje, že chyba převodu a úhlu je frekvenčně nezávislá do 50kHz [21], 16kHz [24].

4.3.2.3. Vliv vnější zátěže na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu

Vnější zátěž přístrojového transformátoru proudu má vliv na chybu převodu a úhlu i v okolí jmenovité frekvence přístrojového transformátoru proudu, jak bylo popsáno v kapitole 3.3.2.2. Tento vliv na chybu převodu a úhlu se však se stoupající frekvencí výrazně nemění. Významný vliv na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu při zvyšující se frekvenci by mohl mít přesycený feromagnetický obvod vnější indukční zátěže. Vzhledem k povoleným mezím napětových (proudových) harmonických v připojovacím bodě TNS 25kV, 50Hz je přesycení feromagnetického obvodu zátěže harmonickými však vyloučeno stejně jako u feromagnetického obvodu přístrojového transformátoru proudu.

4.3.3. Frekvenční závislost chyby převodu a úhlu

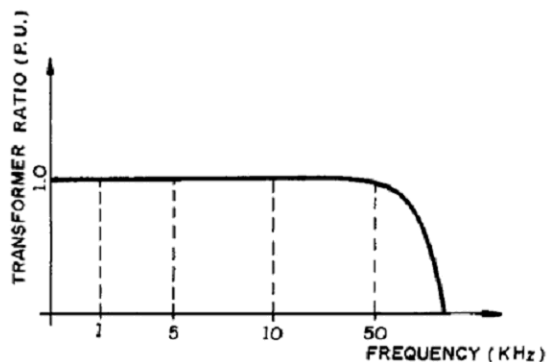
Na *obrázku 4.7 a)* je zobrazena frekvenční závislost chyby převodu přístrojového transformátoru proudu. Na *obrázku 4.7 b)* je zobrazena frekvenční závislost chyby úhlu přístrojového transformátoru proudu. Průběhy jsou získané ze zdroje [24] a vyplývá z nich, že do 16kHz není chyba převodu a úhlu přístrojového transformátoru proudu frekvenčně závislá.



Obrázek 4.7 - a) Frekvenční závislost chyby převodu, *b)* frekvenční závislost chyby úhlu [24]

K podobnému závěru dochází zdroj [21], který potvrzuje, že chybu převodu a úhlu je možné považovat za frekvenčně nezávislou do 50kHz za podmínky, že magnetický tok v jádře je v lineární oblasti. V případě, že tok je mimo lineární oblast (viz **obrázek 4.5**) je těžké odhadnout frekvenční závislost chyby převodu a úhlu [21].

Na **obrázku 4.8** je zobrazena frekvenční závislost chyby převodu.



Obrázek 4.8 – Frekvenční závislost chyby převodu přístrojového transf. proudu [21]

Z **obrázku 4.7** a **4.8** je zřejmé, že chyba převodu a úhlu je frekvenčně nezávislá v širokém frekvenčním pásmu, přesahující sledovanou frekvenční oblast v této práci.

4.3.4. Závěr

Ze dvou nezávislých zdrojů bylo potvrzeno, že přístrojový transformátor proudu je možné použít k měření vyšších harmonických do 100-té harmonické, aniž by byla ovlivněna chyba převodu nebo úhlu frekvenční závislostí.

Frekvenční nezávislost chyby převodu a úhlu přístrojového transformátoru proudu byla ověřena do 50kHz [21], 16kHz [24]:

- přístrojovém transformátoru proudu s převodem 30/5A, izolační napětí 27,5kV, zátěž 15VA [21],
- přístrojovém transformátoru proudu s převodem 200//5/5/5A, izolační napětí 123kV, zátěž 60VA [24].

Vzhledem k tomu, že se neprokázala frekvenční závislost chyby převodu a úhlu přístrojového transformátoru proudu ve sledovaném frekvenčním pásmu do 5kHz nebude výzkum přesnosti frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu předmětem simulací v **kapitole 5** pomocí simulačního programu PSpice.

4.4. Přístrojový induktivní transformátor napětí

4.4.1. Náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí

Pro výzkum frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu do 100-té harmonické je nutné v náhradním schématu uvažovat v souladu s *kapitolou 4.1* vliv kapacit mezi vinutími a kapacit proti kostře.

Jelikož se mi nepodařilo realizovat měření na přístrojovém induktivním transformátoru napětí s izolačním napětím 123kV, oslovil jsem firmu Pfiffner (výrobce přístrojových induktivních transformátorů napětí) s žádostí o poskytnutí hodnot kapacit mezi vinutími a mezi vinutími a kostrou. Ostatní hodnoty náhradního schématu jsem odvodil z měřicích protokolů firmy Pfiffner. Hodnoty kapacit mezi vinutími a mezi vinutími a kostrou však výrobce neměl k dispozici, protože se v souladu s požadavky normy [10] zabývá pouze výzkumem chyby převodu a úhlu na jmenovité frekvenci.

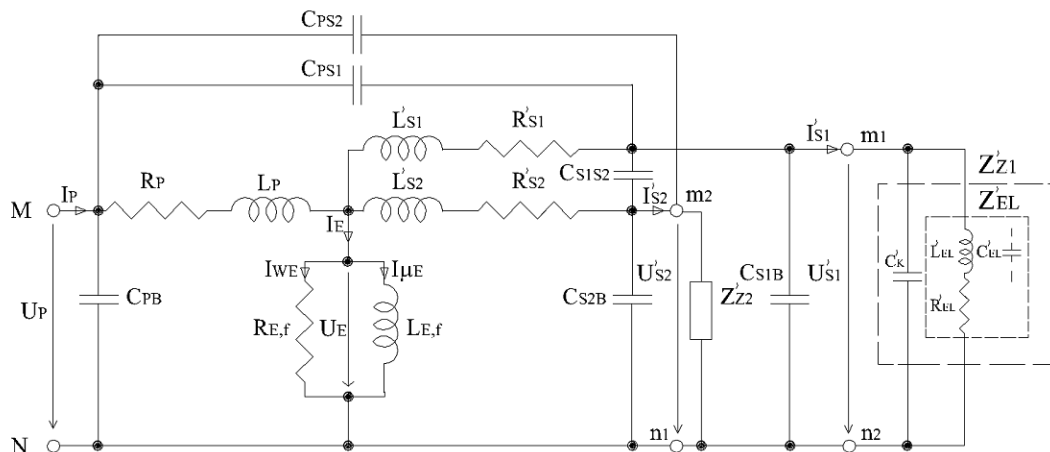
Proto jsem využil k získání náhradního schématu literaturu. Z literatury [18,19] jsem nemohl náhradní schéma použít, protože zde byla zkoumána frekvenční závislost chyby převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí s izolačním napětím od 7,2kV do 27,5kV. Z výsledků měření a simulací však bylo zřejmé, že přístrojový induktivní transformátor napětí má obecně vyšší frekvenční závislost chyby převodu a úhlu než přístrojový transformátor proudu.

Později se mi podařilo získat literaturu [25,27,28], která se zabývala frekvenční závislostí chyby převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí s izolačním napětím 123 - 145kV.

Pouze zdroj [25] však uvedl úplné náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí platné do 10kHz. Náhradní schéma bylo navíc doplněno o hodnoty všech prvků. Zdroj [25] použil k odvození hodnot prvků náhradního schématu přístrojový induktivní transformátor napětí s těmito parametry:

- Typ EMFC 145
- Izolační napětí 145kV
- Převod $110000/\sqrt{3} // 100/\sqrt{3}, 100/\sqrt{3}$ V
- Sekundární vinutí 1 – měření
- Sekundární vinutí 2 – jištění

Jelikož zdroj [25] uvažuje v náhradním schématu přístrojového transformátoru napětí platném pro frekvence do 5kHz zjednodušení, je na **obrázku 4.9** nejdříve uvažováno náhradní schéma přístrojového transformátoru napětí obecně platné pro frekvence do 5kHz.



Obrázek 4.9 - Úplné náhradní schéma přístrojového indukčního transformátoru napětí s dvěma sekundárními vinutími, platné pro frekvence do 5kHz (100-tá harmonická)

Zdroj [24] předpokládá tato zjednodušení obecně platného náhradního schématu (viz **obrázek 4.9**):

- Sériové řazení prvků $R_{E,f}$ a $L_{E,f}$ v náhradním schématu - to je ale v rozporu s literaturou [16,21], která také zkoumá frekvenční závislost chyby převodu a úhlu přístrojových indukčních transformátorů napětí s izolačním napětím 7,2 – 27,5kV. Neodpovídá to ani náhradnímu schématu přístrojového indukčního transformátoru napětí v okolí jmenovité frekvence viz. **obrázek 3.7**, kde se uvažuje také paralelní řazení prvků R_E , L_E . Sériové řazení prvků $L_{E,f}$ a $R_{E,f}$ je zjednodušení, které tedy nevystihuje zcela přesně skutečné poměry v reálném přístrojovém indukčním transformátoru napětí, kde hlavní magnetický tok je buzený proudem magnetizačním:

$$\overline{I_E} = \overline{I_{WE}} + \overline{I_{\mu E}} \quad [\text{A}] \quad (4.8)$$

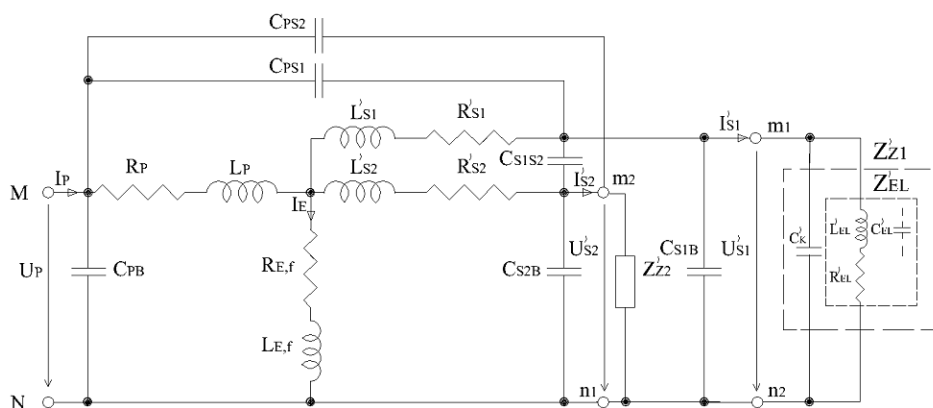
Jelikož zdroje [18,19,22,23] využily toto zjednodušení při výzkumu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojových indukčních transformátorů napětí s izolačním napětím 7,2kV – 27,5kV na vyšších harmonických a vzhledem k tomu že výsledky simulací a měření poskytly velice přesný obraz o frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu těchto přístrojových transformátorů, bude toto zjednodušení

použito pro výzkum frekvenční závislosti chyb převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí s izolačním napětím 123kV.

- Zanedbání frekvenční nezávislosti prvků $R_{E,f}$ $L_{E,f}$ - vzhledem k výsledkům prací autorů [18,19,22,23] kde frekvenčně závislé prvky $R_{E,f}$, $L_{E,f}$ mají vliv na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu, lze předpokládat, že toto zjednodušení není možné. Aby bylo zřejmé, jak se promítne frekvenční závislost prvků $R_{E,f}$ a $L_{E,f}$ na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí bude v **kapitole 5** provedeno porovnání výsledků frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu při uvažování frekvenční závislosti prvků $L_{E,f}$ a $R_{E,f}$ a bez uvažování frekvenční závislosti prvků L_E a R_E .

Jelikož zdroj [25] nestanovil frekvenční závislost prvků $R_{E,f}$ a $L_{E,f}$ použil jsem frekvenční závislost prvků uvedenou zdrojem [18] (viz **kapitola 4.4.3**).

Výsledné zjednodušené náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí platné pro frekvence do 5kHz, které bude použito v **kapitole 5** pro simulace v PSpice, je na **obrázku 4.10**.



Obrázek 4.10 - Zjednodušené (sériové řazení prvků $R_{E,f}$, $L_{E,f}$) náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí s dvěma sekundárními vinutími, platné pro frekvence do 5kHz (100-tá harmonická)

4.4.2. Postup měření hodnot prvků náhradního schématu

4.4.2.1. Postup měření hodnot prvků R_P , L_P , R_S , L_S , L_E , R_E

Hodnoty prvků v náhradním schématu, které jsou charakteristické pro náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí v okolí jmenovité frekvence, lze získat měřením ve stavu nakrátko a naprázdno při jmenovité frekvenci.

Měřením naprázdno a nakrátko získal zdroj [25] tyto hodnoty impedancí viz **tabulka 4.1**:

Měřené hodnoty	f [Hz]	Hodnota [kΩ]
Z_{PS1}	50	$1,9259 + 0,98281j$
Z_P	50	$30,950 + 25,167j$

Tabulka 4.1 – Hodnoty získané měřením naprázdno a nakrátko na přístrojovém induktivním transformátoru napětí typu EMFC145 [25]

Ze změřených impedancí v **tabulce 4.1** lze vypočítat prvky podélné větve náhradního schématu přístrojového induktivního transformátoru napětí (viz. **tabulka 4.2.**) a příčné větve přístrojového induktivního transformátoru napětí (viz. **tabulka 4.3**).

Hodnoty z tabulky 4.1	Poměr	Prvky prim. vinutí	Prvky sek. vinutí – S1
$L_{PS1} = 3,13H$	90% k	$L_P = 2,8170H$	$L_{S1} = 0,313H$
$R_{PS1} = 1,9259k\Omega$	10%	$R_P = 1,7333k\Omega$	$R_{S1} = 192,59\Omega$

Tabulka 4.2 – Výpočet prvků podélné větve náhradního schématu přístrojového induktivního transformátoru napětí [25]

Měřené hodnoty	Hodnoty z tabulky 4.1	Vypočítané hodnoty
Imaginární složka	$25,167j k\Omega$	$L_E = 77,3327H$
Reálná složka	$30,950k\Omega$	$R_E = 29,2167k\Omega$

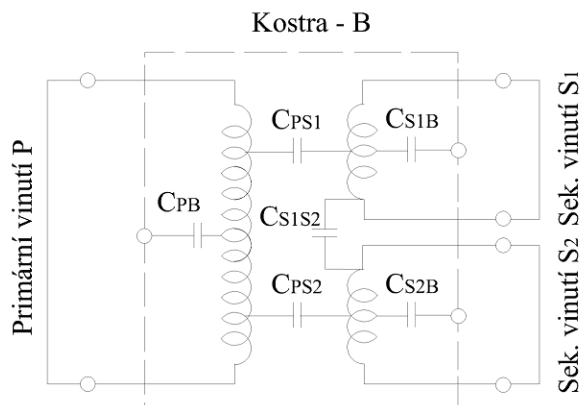
Tabulka 4.3 – Výpočet prvků příčné větve náhradního schématu přístrojového induktivního transformátoru napětí [25]

V **tabulce 4.2** rozdělil zdroj [25] hodnoty prvků R_{PS1} a L_{PS1} na hodnoty prvků R_{P1} , L_{P1} a R_{S1} , L_{S1} v poměru 90% k 10%. V **kapitole 5** bude zkoumán obecný vliv změny hodnoty jednotlivých prvků na změnu frekvenční závislost převodu a úhlu a výsledky simulací tedy nebudou zatíženy poměrem dělení, který lze ale považovat za teoreticky správný.

4.4.2.2. Postup měření a odvození hodnot kapacit C_{PB} , C_{PS1} , C_{PS2} , C_{S1B} , C_{S2B} , C_{S1S2}

Pro výzkum frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojových induktivních transformátorů napětí do 100-té harmonické je nutné uvažovat vliv kapacit mezi vinutími a mezi vinutími a zemí. Zdroj [18] poprvé stanovil, které kapacity je nutné v tomto frekvenčním pásmu v náhradním schématu respektovat a stanovil jejich hodnotu.

Zdroj [25] vyšel ze zdroje [18] a do náhradního schématu přístrojového induktivního transformátoru napětí s izolačním napětím 145kV zahrnul šest kapacit viz. **obrázek 4.11**.



Obrázek 4.11 – Uvažované kapacity mezi vinutími a mezi vinutími a kostrou přístrojového indukčního transformátoru napětí

Náhradní schéma přístrojového indukčního transformátoru napětí se zahrnutím těchto kapacit je na **obrázku 4.9** a na **obrázku 4.10**.

„Tyto kapacity mezi vinutími a mezi vinutími a kostrou nemohou být měřeny přímo, protože jsou uvnitř přístrojového indukčního transformátoru napětí a nemohou být odděleny při jakémkoliv testu. Tak jakékoliv měření nemůže být přímé měření potřebných kapacit v náhradním schématu, ale měření spojení kapacit. Více detailní analýzy ukázaly, že tyto kapacity jsou v reálném transformátoru spojeny do 4-rohové symetrické sítě (polygon), což platí zvláště při vysokých frekvencích jak je ukázáno na **obrázku 4.12** (impedance virtuálního transformátoru má být tak nízká, že na vyšších frekvencích bude transformátor reprezentován pouze polygonem kapacit). K odhadu hodnoty každé kapacity je potřebné měření, celkem je nutné provést 6 měření.“ [25].

Popis měření kapacit

„Během těchto šesti měření hodnot kapacit, jsou všechna vinutí transformátoru spojena nakrátko, jak je ukázáno na **obrázku 4.11**. Přístrojový indukční transformátor napětí je napájen 100V a do sekundárního vinutí se zavede impulz $1,2/50\mu s$. Během testu byla měřena impedance respektive napětí a proud digitálním osciloskopem. Spojení kapacit bylo uvažováno mezi vinutími a mezi každým vinutím a kostrou transformátoru (poznámka: v tomto měření je primární vinutí odděleno od kostry).“ [25].

Při analýze měření bylo nejdříve spočítáno spektrum napětí a proudu. Dále byla spočítána frekvenčně nezávislá kapacita ze spektra měřeného napětí a proudu takto [25]:

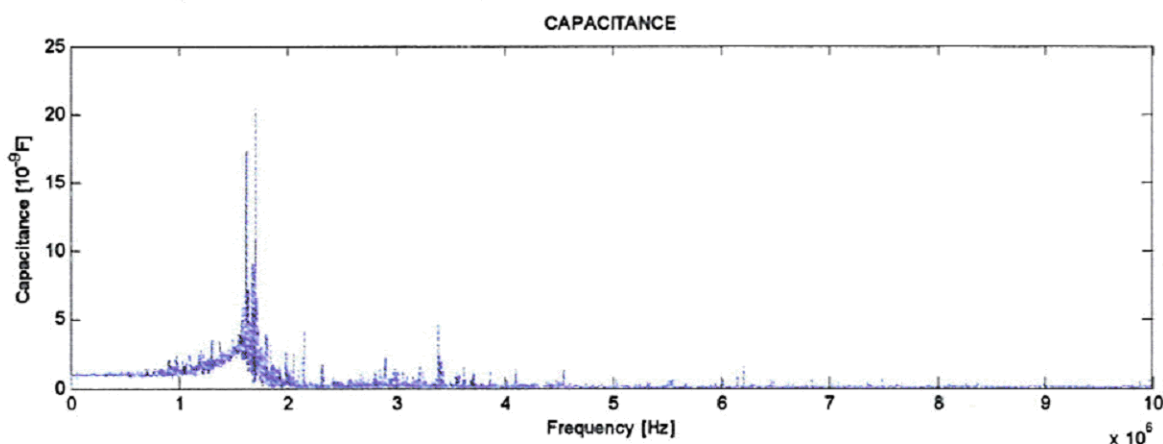
$$C(\omega) = \frac{1}{\omega} \operatorname{imag} \left(\frac{DFT(i)}{DFT(v)} \right) \quad [\text{F}] \quad (4.9)$$

kde: ω je úhlová frekvence [rad/s]

DFT(v) je spektrum napětí

DFT(i) je spektrum proudu.

Příklad měření jedné ze šesti měřených kapacit je ukázán na následujícím obrázku. Odečtená kapacita je vzata z neproměnné části křivky, do 1 MHz viz **obrázek 4.12**“.

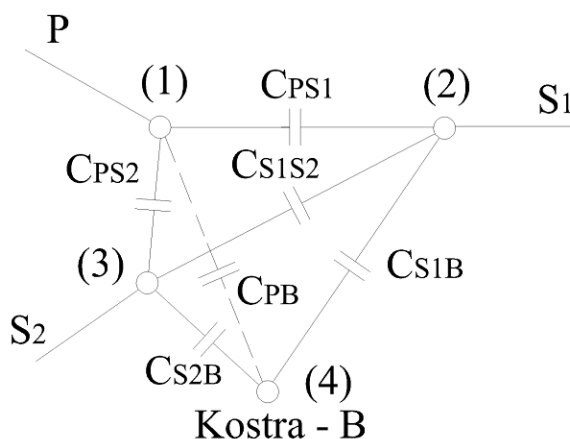


Obrázek 4.12 - Kapacita P-S1, odečtená z křivky získané impulsním testem [25]

Přepočítání sítě kapacit

Zdroj [25] vypočítal kapacity náhradního modelu z kapacit měřených za použití systému šesti rovnic, které řešil „Gauss-Seidelovou iterační“ metodou.

„Základní myšlenka spočítání všech šesti kapacit uvnitř sítě kapacit, je ukázána na **obrázku 4.13**. Do výpočtu jsou zahrnuty vždy všechny kombinace měření (6) mezi rohy polygonu (1,2,3,4) a mezi vinutími transformátoru - primární (P), sekundární (S1), sekundární (S2) a kostrou transformátoru, jak je ukázáno na **obrázku 4.11**.“ [25].



Obrázek 4.13 - Spojení kapacit v přístrojovém induktivním transformátoru napětí při měření na vysokých frekvencích

„Například hodnota kapacity C_{PS1} se určí výpočtem ze sítě kapacit viz. *rovnice 4.9*“ [25]

takto:

$$C_{PS1} = C_{12} = \frac{C_{PB} \cdot C_{S1B}}{C_{PB} + C_{S1B} + C_{S2B}} - \frac{\left(C_{PS2} + \frac{C_{PB} \cdot C_{S2B}}{C_{PB} + C_{S1B} + C_{S2B}} \right) \cdot \left(C_{S1S2} + \frac{C_{S2B} \cdot C_{S1B}}{C_{PB} + C_{S1B} + C_{S2B}} \right)}{\left(C_{PS2} + C_{S1S2} + \frac{C_{S2B} \cdot C_{S1B} + C_{PB} \cdot C_{S2B}}{C_{PB} + C_{S1B} + C_{S2B}} \right)} \quad [F] \quad (4.10)$$

Tyto hodnoty kapacit uvnitř polygonu jsou přirozeně neznámé, jen měřené kapacity jsou známé: C_{12} , C_{13} , C_{14} , C_{24} , C_{34} , C_{23} . Pro každou kapacitu v polygonu pak musí být odvozena rovnice obdobná jako pro C_{PS1} . Měřené hodnoty kapacit a vypočtené hodnoty kapacit jsou uvedeny v *tabulce 4.4*.“ [25].

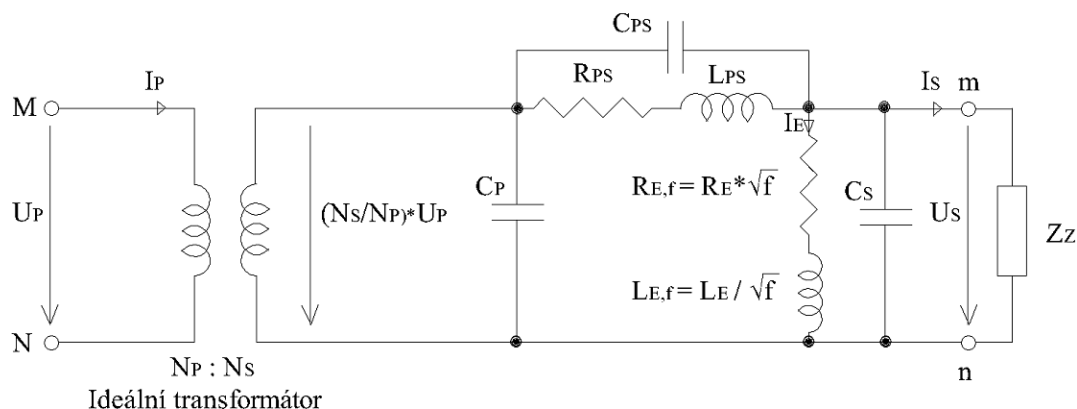
Měřené kapacity		Vypočítané kapacity pomocí Gauss-Seidelovi iterační metody	
Název	Hodnota [nF]	Název	Hodnota [nF]
C_{12}	1,1	C_{PS1}	0,5371
C_{13}	1,1	C_{PS2}	0,5371
C_{23}	2,8	C_{S1S2}	2,4754
C_{14}	0,6	C_{PB}	0,4144
C_{24}	0,5	C_{S1B}	0,1121
C_{34}	0,5	C_{S2B}	0,1121

Tabulka 4.4 - Měřené a vypočítané hodnoty kapacit přístrojového indukčního transformátoru napětí [25]

4.4.3. Frekvenční závislost chyby převodu a úhlu

Přesnost měření přístrojového indukčního transformátoru napětí s izolačním napětím do 27,5kV na vyšších harmonických byla předmětem výzkumu zdroje [18,19].

Zdroj [18] odvodil obecně platné náhradní schéma přístrojového indukčního transformátoru napětí platné pro frekvenční pásmo do 10kHz, které je na *obrázku 4.14*. V tomto náhradním schématu určil prvky L_E , R_E jako frekvenčně závislé ($L_{E,f}$, $R_{E,f}$) a použil sériové řazení prvků $L_{E,f}$, $R_{E,f}$.



Obrázek 4.14 – Náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí s izolačním napětím 7,2kV platné pro frekvence do 10kHz [18]

- kde: R_{PS} odpor primárního a sekundárního vinutí [Ω]
 L_{PS} rozptylová indukčnost primárního a sekundárního vinutí [F]
 C_{PS} kapacita mezi primárním a sekundárním vinutím [F]
 C_P kapacita mezi primárním vinutím a kostrou [F]
 C_S kapacita mezi sekundárním vinutím a kostrou [F]
 $R_{E,f}$ frekv. závislý odpor repr. ztráty hysterezní a vířivé ve spojce a jádře [Ω]
 $L_{E,f}$ frekvenčně závislá magnetizační indukčnost spojky a jádra [H]

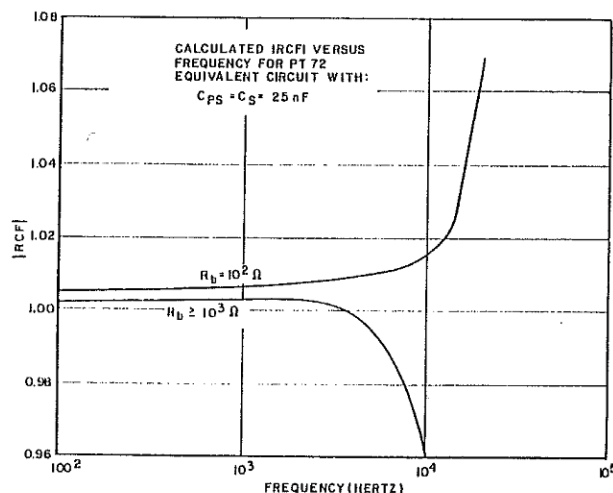
Pro frekvenčně závislé prvky magnetizační větve platí vztahy [18]:

$$R_{E,f} = R_E \cdot f^{K_R} [\Omega] ; L_{E,f} = L_E \cdot f^{K_L} [H] \quad (4.8)$$

- kde: R_E frekvenčně nezávislý odpor reprezentující ztráty hysterezní a vířivé ve spojce a jádře [Ω]
 L_E frekvenčně závislá magnetizační indukčnost spojky a jádra [H]
 K_R exponent definující frekvenční závislost odporu magnetizační větve [-]
 K_L exponent definující frekvenční závislost indukčnosti mag. větve [-]

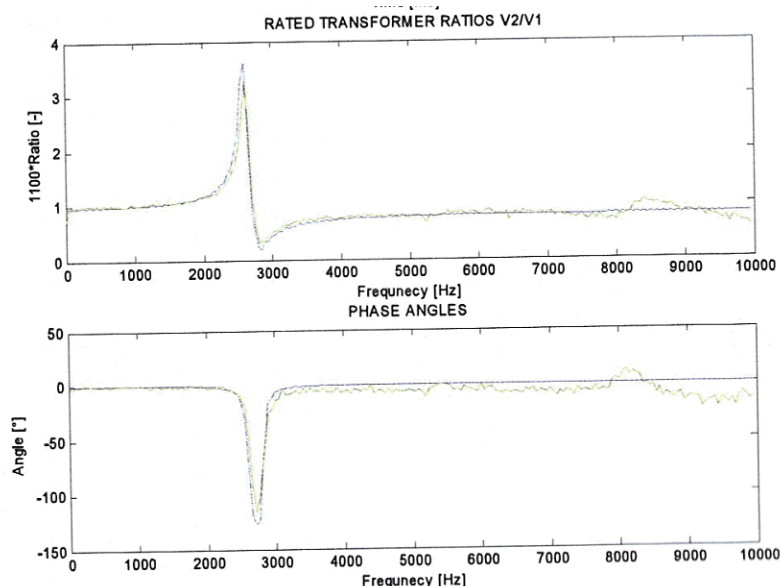
Zdroj [17] ověřil, že koeficient $K_R = + 0,5$ a koeficient $K_L = - 0,5$ platí pro široké spektrum izolačních napětí přístrojových induktivních transformátoru napětí.

Na **obrázku 4.15** je pak zobrazen průběh chyby převodu konkrétního přístrojového induktivního transformátoru napětí typu PT72 s izolačním napětím 7,2kV. Chyba převodu zde je prezentována v podobě činitele RCF (hodnota, která po vynásobení převodem dává skutečný převod mezi napětím primárním a sekundárním).



Obrázek 4.15 - Průběh chyby převodu přístrojového indukčního transformátoru napětí s izolačním napětím 7,2kV [18]

Na **obrázku 4.16** je průběh frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojového indukčního transformátoru napětí, který byl simulací odvozen zdrojem [25]. Jde pouze o informativní průběh frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu, protože zdroj [25], předpokládá frekvenční nezávislost prvků R_E , L_E . Potom hodnoty R_E , L_E v náhradním schématu úplně zanedbává, což není možné, protože tyto hodnoty jsou nezanedbatelně veliké. Se zvyšující se frekvencí navíc výrazně roste vliv frekvenčně závislých prvků $R_{E,f}$, $L_{E,f}$ na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu přístrojového indukčního transformátoru napětí.



Obrázek 4.16 – Průběh frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu indukčního transformátoru napětí s izolačním napětím 123kV [25]

Z *obrázku 4.16.* a *4.17* je zřejmé, že přístrojový induktivní transformátor napětí má výrazně vyšší frekvenční závislost chyby převodu a úhlu než přístrojový transformátor proudu.

4.4.4. Závěr

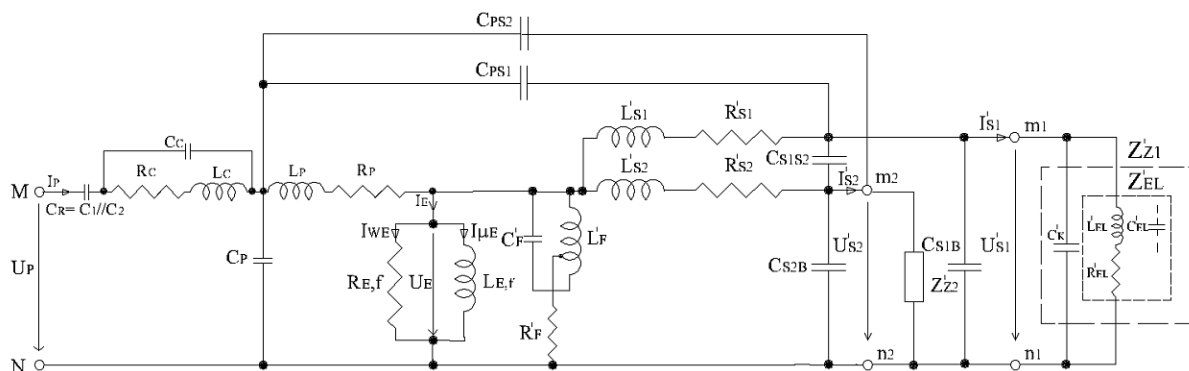
Jelikož přístrojový induktivní transformátor napětí má frekvenčně závislou chybu převodu a úhlu ve frekvenčním pásmu sledovaném v této práci bude v *kapitole 5* pomocí programu PSpice simulací prověřena jeho frekvenční závislost chyby převodu a úhlu.

V *kapitole 5* bude zkoumán vliv změny prvků náhradního schématu na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu. Cílem *kapitoly 5* bude dále porovnat grafy frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu při uvažování frekvenční závislosti prvků R_E , L_E a bez uvažování frekvenční závislosti prvků R_E , L_E .

4.5. Přístrojový kapacitní transformátor napětí

4.5.1. Náhradní schéma přístrojového kapacitního transformátoru napětí

Na *obrázku 4.17* je náhradní schéma přístrojového kapacitního transformátoru napětí platné pro frekvence do 10kHz [9].



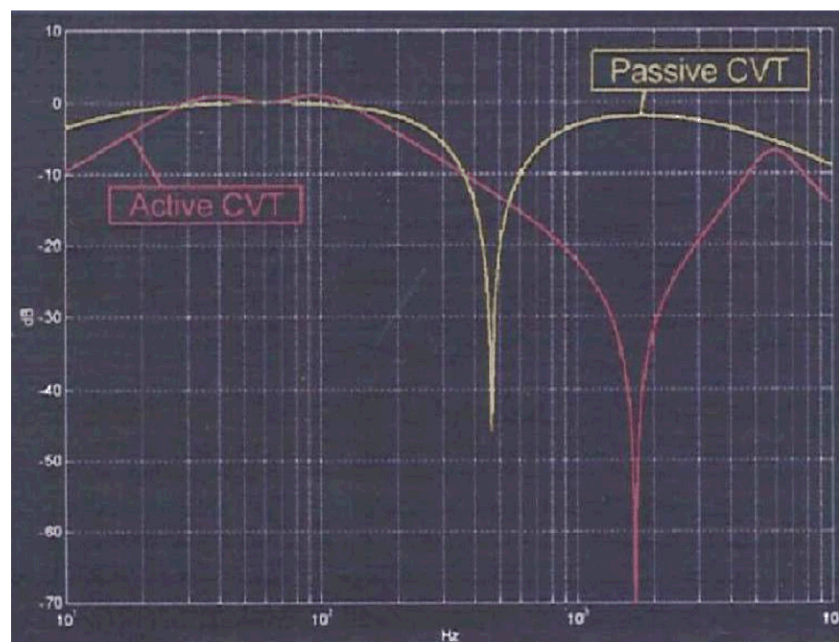
Obrázek 4.17 – Náhradní schéma přístrojového kapacitního transformátoru napětí platné pro frekvence do 10kHz [9]

- kde: C_R celková kapacita kondenzátor C_1 a C_2 [F]
 L_C indukčnost kompenzační tlumivky [H]
 R_C odpor kompenzační tlumivky [Ω]
 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 [Ω]
$R_{E,f}$	frekvenčně závislý odpor reprezentující ztráty hysterezní a vířivé ve spojce a jádru [Ω]
$L_{E,f}$	frekvenčně závislá magnetizační indukčnost spojky a jádra [H]
C_P	kapacita středněnapětového transformátoru proti kostře [F]
C_F	kapacita tlumícího zařízení [F]
L_F	indukčnost tlumícího zařízení [H]
R_F	odpor tlumícího zařízení [Ω]

4.5.2. Frekvenční závislost chyby převodu a úhlu

Na **obrázku 4.18.** je zobrazena frekvenční závislost chyby převodu a úhlu přístrojového kapacitního transformátoru napětí s izolačním napětím 123kV.



Obrázek 4.18 - Průběh frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojového kapacitního transformátoru napětí s izolačním napětím 123kV ve frekvenčním pásmu do 10kHz [9]

Z **obrázku 4.18.**, že zřejmé, že přístrojový kapacitní transformátor napětí vykazuje nepřijatelné chyby převodu a úhlu již v okolí jmenovité frekvence (frekvenční pásmo od 50Hz viz **obrázek 3.27** do 100Hz viz **obrázek 4.18** – pohyb v tomto rozmezí ovlivňuje typ použitého tlumícího zařízení, požadovaná třída přesnosti a datum výroby přístrojového kapacitního transformátoru napětí). Maxima této chyby (přípustná mez překročena 225-350krát) nabývá

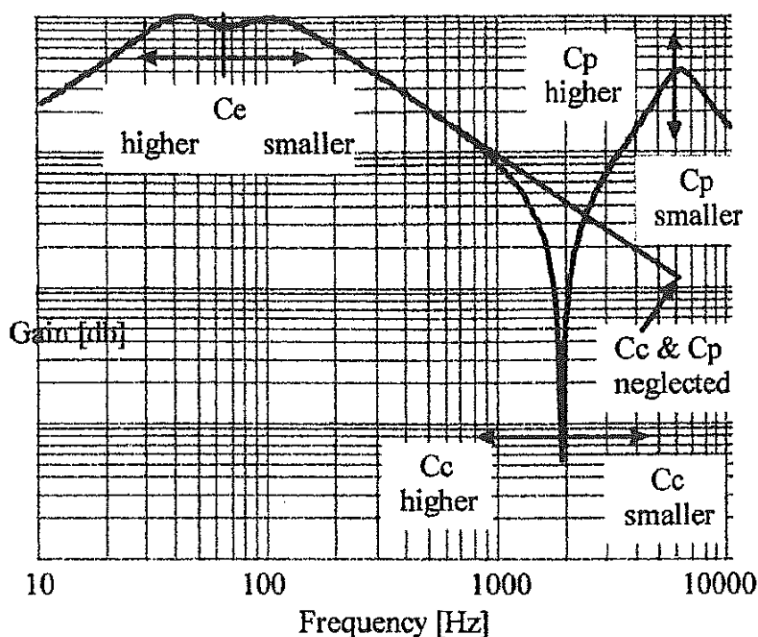
chyba převodu při měření na frekvenci v okolí 20-té harmonické. Tento řád harmonické se nachází mezi sledovanými distributorem elektrické energie. V případě měření harmonických přístrojovým kapacitním transformátorem napětí by měření bylo zcela neprůkazné právě vlivem značného ovlivnění chyby převodu a úhlu frekvenční závislostí přístrojového kapacitního transformátoru napětí.

Z *obrázku 4.18* je také vidět, že tlumící zařízení má značný vliv na frekvenční závislost chyby převodu přístrojového kapacitního transformátoru napětí. Oba typy tlumících zařízení byly popsány v *kapitole 3.5.1*. Pasivní tlumící zařízení je dražší, a považuje se za lepší z hlediska frekvenční odezvy. Jak, ale ukazuje *obrázek 4.18*, pasivní tlumící zařízení má sice pozitivní vliv na snížení maximální hodnoty chyby převodu, ale posouvá maximum chyby převodu do blízkosti 12-té harmonické.

Z *obrázku 4.18* vyplývá, že frekvenční závislost chyby převodu a úhlu je značná a případná měření napěťových harmonických tímto přístrojovým transformátorem je neprůkazné.

4.5.3. Výzkum vlivu změny hodnot jednotlivých prvků náhradního schématu na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu

Na *obrázku 4.19* je znázorněn vliv změny hodnoty jednotlivých prvků náhradního schématu na změnu frekvenční závislosti chyby převodu přístrojového kapacitního transformátoru napětí.



Obrázek 4.19 - Vliv změny hodnoty prvků náhradního schématu na průběh frekvenční závislosti chyby převodu přístrojového kapacitního transformátoru napětí [16]

4.5.4. Závěr

Z *obrázku 4.19* vyplývá, že přístrojový kapacitní transformátor napětí není vhodný pro měření na vyšších napěťových harmonických, protože chyba převodu a úhlu je značně frekvenčně závislá. Případná měření přístrojovým kapacitním transformátorem napětí na vyšších harmonických by byla neprůkazná právě kvůli značné chybě převodu a úhlu způsobené touto frekvenční závislostí.

V situaci, kdy distributor elektrické energie monitoruje dodržování povolených úrovní napěťových harmonických v připojovacím bodě TNS 25kV, 50Hz, je nutné zamezit instalaci těchto přístrojových transformátorů napětí do rozveden 110kV, TNS 25kV, 50Hz.

Vzhledem k tomu, že ve sledovaném frekvenčním pásmu do 5kHz je frekvenční závislost chyby převodu a úhlu zcela zřejmá a chyba převodu a úhlu je nepřijatelně vysoká, nebude v *kapitole 5* v programu PSpice simulací dále prokazována nevhodnost použití těchto přístrojových transformátorů napětí k měření na vyšších napěťových harmonických.

5. Simulace frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí v rozvodně 110kV TNS 25kV, 50Hz

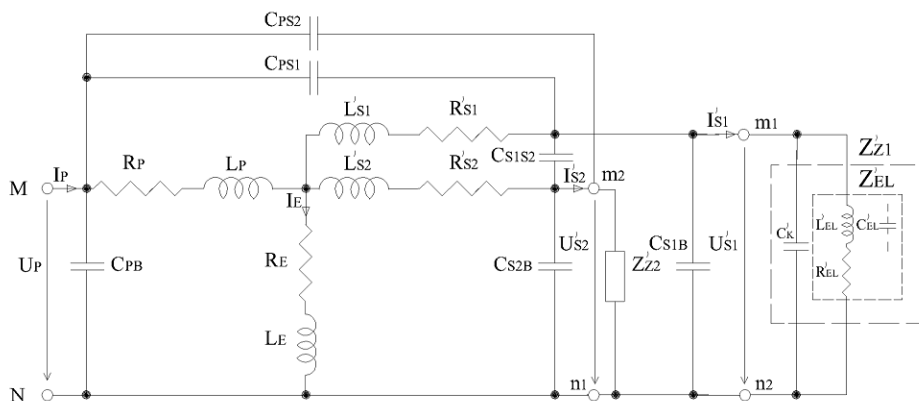
5.1. Náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí

Zjednodušená (sériové řazení R_E , L_E popř. $R_{E,f}$, $L_{E,f}$) náhradní schémata přístrojového induktivního transformátoru napětí platná pro frekvence do 5kHz, která budou použita pro simulace v PSpice, jsou na *obrázku 5.1.* a *5.2.*

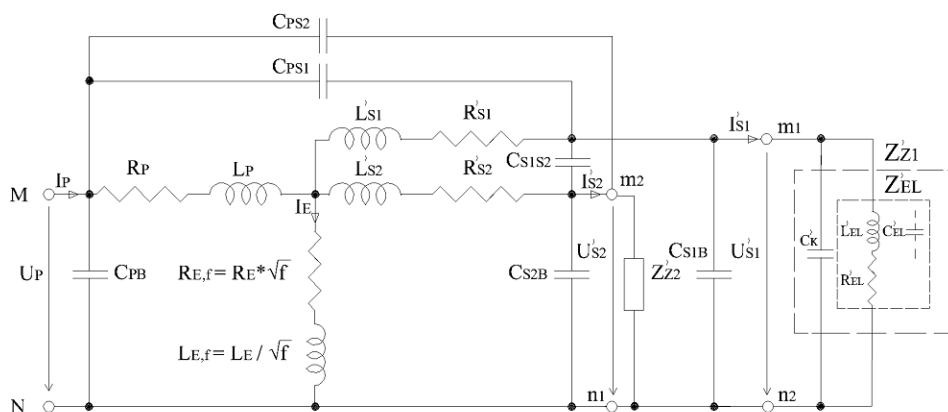
Přičemž *obrázek 5.1* nerespektuje frekvenční závislost prvků R_E a L_E v souladu se závěry zdroje [25] a *obrázek 5.2* respektuje frekvenční závislost prvků $R_{E,f}$ $L_{E,f}$ v souladu se závěry zdroje [18,19].

Důvody použití obou náhradních schémat pro výzkum frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí do 100-té harmonické jsou popsány v *kapitole 4.4.*

Frekvenční závislost prvků náhradního schématu $R_{E,f}$ $L_{E,f}$ se předpokládá podle *rovnice 4.8.* Obě náhradní schémata budou předmětem výzkumu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu do 100-té harmonické, přičemž získané průběhy frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu budou řazeny pod sebe.



Obrázek 5.1 - Zjednodušené (sériové řazení R_E a L_E) náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí s dvěma sekundárními vinutími, platné pro frekvence do 5kHz (100-tá harmonická) – prvky L_E , R_E frekvenčně nezávislé [25]



Obrázek 5.2 - Zjednodušené (sériové řazení R_E a L_E) náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí s dvěma sekundárními vinutími, platné pro frekvence do 5kHz (100-tá harmonická) – prvky $L_{E,f}$, $R_{E,f}$ frekvenčně závislé [18,25]

Jelikož zdroj [25] hodnoty náhradních prvků měřil na straně 110kV není nutné hodnoty změřené na sekundární straně dále přepočítávat (vyjma přidaného břemene) a lze tedy do náhradního schématu doplnit hodnoty odvozené v *tabulce 4.1, 4.2 a 4.3*.

5.2. Hodnoty prvků náhradního schématu

Hodnoty prvků náhradního schématu byly získány měřením nakrátko a naprázdno na přístrojovém transformátoru s izolačním napětím 123kV používaném v rozvodnách 110kV, TNS 25kV, 50Hz. Kapacity mezi vinutími a mezi vinutími a zemí byly stanoveny měřením a kapacity v náhradním schématu pak z nich byly vypočítané (viz *kapitola 4.4.2.2*).

Prvky náhradního schématu bylo změřeny a odvozeny pro přístrojový induktivní transformátor napětí:

Typ EMFC 145

Izolační napětí 145kV

Převod $110000/\sqrt{3} // 100/\sqrt{3}, 100/\sqrt{3} \text{ V}$

Sekundární vinutí 1 – měření

Sekundární vinutí 2 – jištění

Hodnoty prvků náhradního schématu přístrojového induktivního transformátoru napětí typu EMFC 145:

- C_{PB} kapacita mezi primárním vinutím (P) a kostrou (B) 0,4144 [nF]
- C_{PS1} kapacita mezi primárním vinutím (P) a prvním sekundárním vinutím (S1) 0,5371 [nF]
- C_{PS2} kapacita mezi primárním vinutím (P) a druhým sekundárním vinutím (S2) 0,5371 [nF]
- C_{S1B} kapacita mezi prvním sekundárním vinutím (S1) a kostrou (B) 0,1121 [nF]
- C_{S2B} kapacita mezi druhým sekundárním vinutím (S2) a kostrou (B) 0,1121 [nF]
- C_{S1S2} kapacita mezi prvním sekundárním vinutím (S1) a druhým (S2) sekundárním vinutím 2,4754 [nF]
- R_P činný odpor primárního vinutí 1,7333 [k Ω]
- L_P rozptylová indukčnost primárního vinutí 2,8170 [H]
- R_E odpor reprezentující ztráty hysterezní a vířivé ve spojení frekvenčně nezávislý prvek [25] 29,2167 [k Ω]
- L_E magnetizační indukčnost spojky a jádra frekvenčně nezávislý prvek [25] [H] 77,3327 [H]
- L'_{S1} rozptylová indukčnost prvního sekundárního vinutí přepočítaná na primární stranu 0,313 [H]
- R'_{S1} činný odpor prvního sekundárního vinutí přepočítaný na primární stranu 192,59 [Ω]
- L'_{S2} rozptylová indukčnost druhého sekundárního vinutí přepočítaná na primární stranu 0,313 [H]
- R'_{S2} činný odpor druhého sekundárního vinutí přepočítaný

	na primární stranu	192,59 [Ω]
➤ Z_{Z1}'	vnější břemeno sekundárního vinutí pro měření přístr. transformátoru napětí přepočítané na primární stranu	1 [TΩ]
➤ Z_{Z2}'	vnější břemeno sekundárního vinutí pro jištění přístr. transformátoru napětí přepočítané na primární stranu	1 [TΩ]

Jelikož cílem práce je zkoumat frekvenční závislost chyby převodu a úhlu pro přístrojové induktivní transformátory napětí v rozvodnách 110kV TNS 25kV, 50Hz různých typů, je nutné hodnoty jednotlivých prvků měnit v rozmezí hodnot $\pm 40\%$, aby byly pokryty odchylky hodnot prvků různých typů přístrojových induktivních transformátorů napětí používaných v rozvodnách 110kV TNS 25kV, 50Hz. Při změně hodnot prvků náhradního schématu v tomto rozmezí bude zároveň zřejmé jaký vliv má měnící se hodnota náhradního prvku na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí.

5.3. Kontrola hodnot kapacit mezi vinutími a mezi vinutími a kostrou

Chybu převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí na vyšších frekvencích ovlivňují kapacity mezi vinutími a mezi vinutími a kostrou. Zdroj [29] uvádí, že při studování chyby převodu a úhlu na frekvencích vyšších než 80kHz je možné přístrojový induktivní transformátor napětí nahradit pouze těmito kapacitami. Zdroj [25] také uvažuje, že na vyšších frekvencích je možné v náhradním schématu ponechat pouze tyto kapacity (viz. **obrázek 4.13**).

Jelikož tyto kapacity nelze měřit přímo, odvodil je zdroj [25] z kapacit měřených Gauss-Seidelovu metodu, kterou řeší složité soustavy rovnic viz. **rovnice 4.10**.

Za pomoci simulačního programu PSpice lze provést jednoduchou kontrolu, že výpočet kapacit v náhradním schématu byl proveden z měřených kapacit proveden správně.

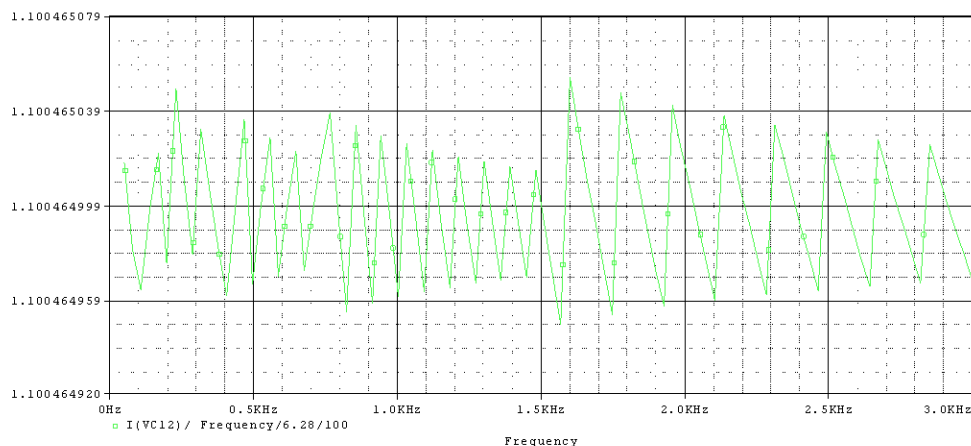
V polygonu kapacit na **obrázku 4.14** se zvolí dva libovolné uzly, ke kterým je připojena kapacita s hodnotou vypočtenou (v případě C_{PS1} uzel 1,2). Mezi tyto uzly se připojí zdroj napětí 100V DC.

Vytvoří se zdrojový program v PSpice, který obsahuje hodnoty kapacit spočítaných (např. pro C_{PS1}). Kapacita měřená (C_{12}) se pak zobrazí v PSpice po zadání vzorce:

$$C = \frac{I}{\omega \cdot U} \quad [\text{F}] \quad (5.1)$$

a odečtená hodnota by měla odpovídat hodnotě kapacity měřené v **tabulce 4.4** ($C_{12} = 1,1\text{nF}$).

Na **obrázku 5.3** je graf zobrazující výsledek **rovnice (5.1)**, který dokladuje, že vypočtená hodnota kapacity C_{PS1} byla ze soustavy 6 rovnic řešených Gauss-Seidelovou iterační metodou odvozena správně. V **příloze 1** jsou pak na **obrázcích P-1.1-1.5** uvedeny grafy zbývajících vypočtených kapacit.



Obrázek 5.3 - Prověření odvození hodnoty C_{PS1} z měřené hodnoty C_{12}

5.4. Výzkum vlivu změny hodnot prvků náhradního schématu na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu

Pro výzkum vlivu změny hodnoty prvku náhradního schématu na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu je uvažováno vnější břemeno Z'_{Z1} a Z'_{Z2} o hodnotě $1T\Omega$, což vytváří požadovanou stejnosměrnou cestu k uzlu 0 a zároveň odpovídá hodnotám činných odporů měřících a jisticích přístrojů.

5.4.1. Vliv změny hodnoty prvku L_P na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu

V souladu s **kapitolou 5.1** budeme měnit hodnotu prvku L_P v náhradním schématu na **obrázku 5.1** a **5.2** a budeme sledovat změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu při uvažování frekvenční závislosti prvků $R_{E,f}$, $L_{E,f}$ a bez uvažování frekvenční závislosti prvků R_E a L_E .

Na **obrázku 5.4 až 5.7** jsou grafy frekvenční závislosti převodu přístrojového induktivního transformátoru napětí při proměnné frekvenci (pokud bylo sledované frekvenční pásmo do 5kHz zkráceno je to z důvodu neproměnnosti chyby převodu v tomto intervalu), proměnné hodnotě L_P (v mezích -40% až +40%) takto:

- červená křivka odpovídá frekvenční závislosti chyby převodu PTN při hodnotě

$$L_P = 2,817 \text{ H}^*,$$

- modrá křivka odpovídá frekvenční závislosti chyby převodu PTN při hodnotě

$$L_P + 40\%^*$$

- zelená křivka odpovídá frekvenční závislosti chyby převodu PTN při hodnotě

$$L_P - 40\%^*$$

- * U ostatních grafů frekvenční závislosti chyby převodu v této kapitole bude dodržen stejný postup barevného značení průběhu frekvenční závislosti.

Na **obrázku 5.8 až 5.11** jsou grafy frekvenční závislosti chyby úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí při proměnné frekvenci, proměnné hodnotě L_P (v mezích -40% až +40%) takto:

- červená křivka odpovídá frekvenční závislosti chyby úhlu PTN při hodnotě

$$L_P = 2,817 H^*,$$

- modrá křivka odpovídá frekvenční závislosti chyby úhlu PTN při hodnotě

$$L_P - 40\%^*,$$

- zelená křivka odpovídá frekvenční závislosti chyby úhlu PTN při hodnotě

$$L_P + 40\%^*.$$

- * U ostatních grafů frekvenční závislosti chyby úhlu v této kapitole bude dodržen stejný postup barevného značení průběhů frekvenční závislosti

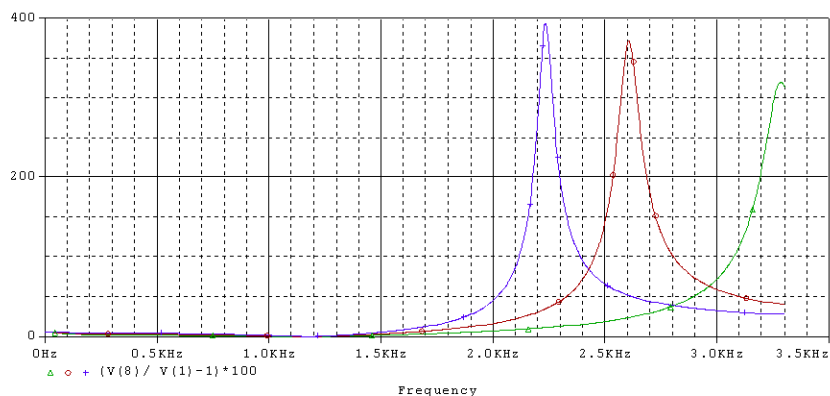
Dílčí závěr

Změna hodnoty prvku L_P má největší vliv ve sledované frekvenční oblasti na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu v celém náhradním schématu, což je zřejmé z **obrázku 5.4 a 5.5** (převod) a **obrázku 5.8 a 5.9** (úhel). S rostoucí frekvencí klesá hodnota L_P u frekvenčně závislé magnetizační větve (viz **rovnice 4.8**). Nejvyšší hodnotě prvku L_P odpovídá nejnižší frekvenční závislost chyby převodu a úhlu. S klesající hodnotou L_P výrazně stoupá frekvenční závislost chyby převodu a úhlu.

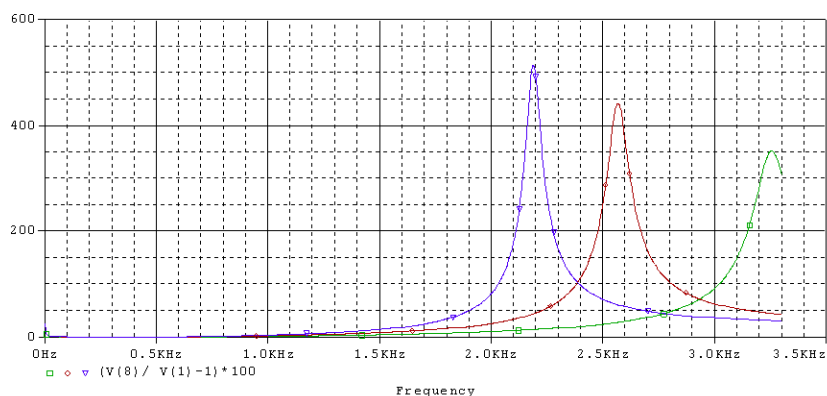
Z detailních obrázku vlivu změny hodnoty L_P na změnu frekvenční závislosti chyby převodu je zřejmé, že frekvenční závislost chyby převodu nejdříve klesá k nule, pak ale strmě narůstá. Negativně se na chybě převodu jistě projeví uvažování frekvenční závislosti magnetizační větve, protože posouvá minimum frekvenční závislosti do okolí 500Hz a pak následuje nárůst frekvenční závislosti chyby převodu.

Z **obrázku 5.8 a 5.9** je zřejmé, že vliv změny hodnoty prvku L_P má výrazný vliv na frekvenční závislost chyby úhlu.

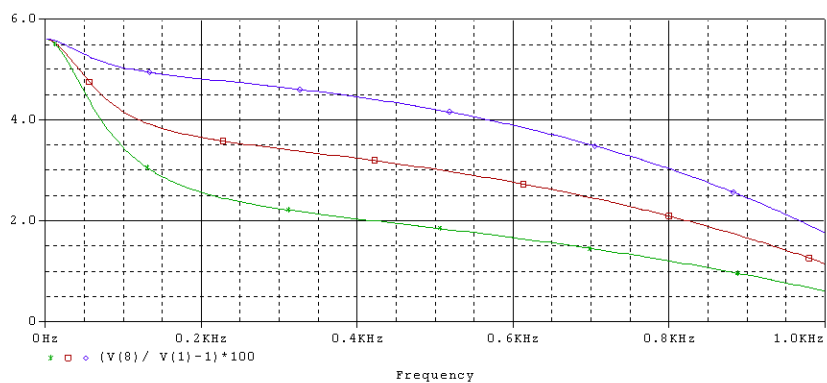
Dosažení co nejvyšší hodnoty L_P je předpoklad k snížení nepřijatelně vysoké frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí (PTN).



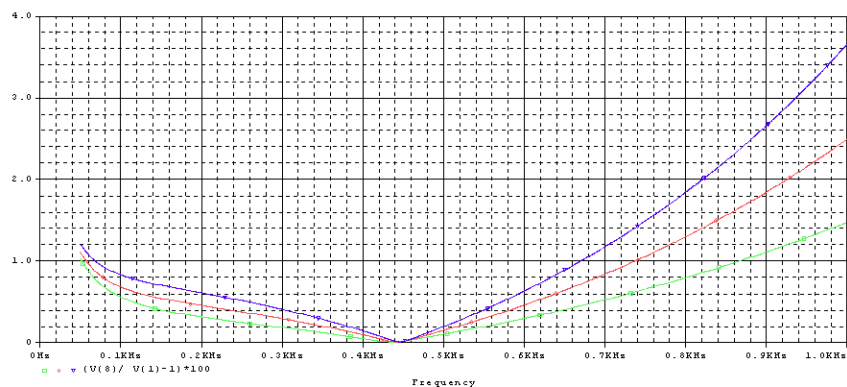
Obr. 5.4 – Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna L_P , L_E a R_E frekv. nezávislé



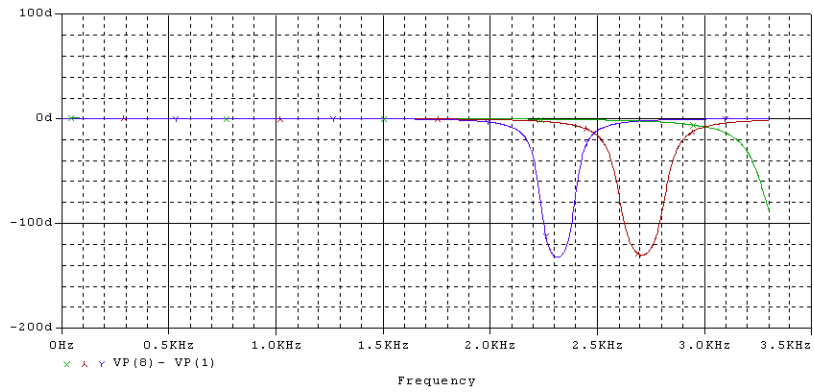
Obr. 5.5 – Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna L_P , L_E a R_E frekv. závislé



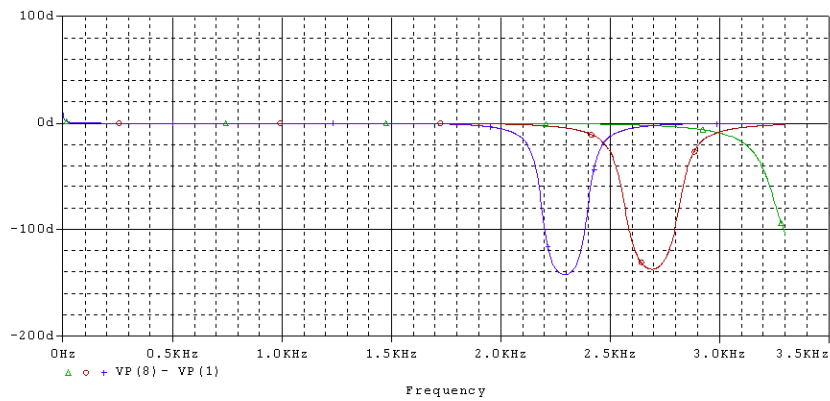
Obr. 5.6 – Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna L_P , L_E a R_E frekv. nezávislé (detail)



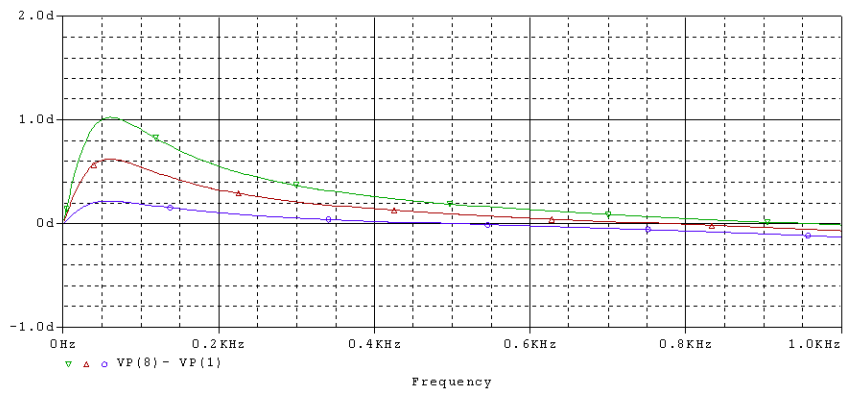
Obr. 5.7 – Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna L_P , L_E a R_E frekv. závislé (detail)



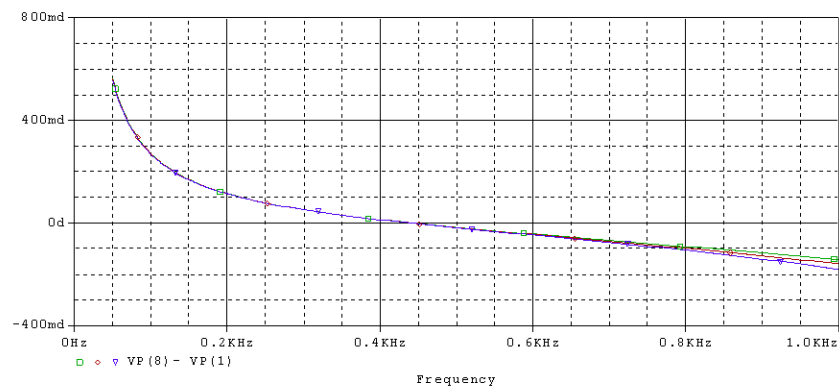
Obr. 5.8 – Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna L_P , L_E a R_E frekvenčně nezávislé



Obr. 5.9 – Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna L_P , L_E a R_E frekvenčně závislé



Obr. 5.10 – Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna L_P , L_E a R_E frekv. nezávislé (detail)



Obr. 5.11 – Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna L_P , L_E a R_E frekv. závislé (detail)

5.4.2. Vliv změny hodnoty prvku R_P na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu

V souladu s *kapitolou 5.1* budeme měnit hodnotu prvku R_P v náhradním schématu na *obrázku 5.1 a 5.2*. Simulace budou provedeny při uvažování frekvenční závislosti prvků $R_{E,f}$, $L_{E,f}$ a bez uvažování frekvenční závislosti R_E a L_E .

V *příloze 2* jsou na obrázku *P-2.3 až P-2.6* grafy frekvenční závislosti převodu přístrojového transformátoru napětí při proměnné frekvenci (pokud bylo sledované frekvenční pásmo do 5kHz zkráceno je to z důvodu neproměnnosti chyby převodu v tomto intervalu) a proměnné hodnotě R_P v mezích -40% až +40%.

Na *obrázku P-2.7 až P-2.10* jsou grafy frekvenční závislosti chyby úhlu přístrojového transformátoru napětí při proměnné frekvenci, proměnné hodnotě prvku R_P (v mezích -40% až +40%).

Dílčí závěr

Změna hodnoty R_P má významný vliv ve sledované frekvenční oblasti na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu, ale pouze ve frekvenčním pásmu od 2,6 do 2,8kHz. S rostoucí frekvencí stoupá hodnota R_P . Nejvyšší hodnotě prvku R_P odpovídá nejvyšší frekvenční závislost chyby převodu a úhlu. S klesající hodnotou R_P výrazně klesá frekvenční závislost chyby převodu a úhlu.

Ve frekvenčním pásmu mimo interval 2,6 - 2,8kHz nemá změna hodnoty R_P výrazný vliv na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu.

5.4.3. Vliv změny hodnoty prvku R_{S1} (R_{S2}) na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu

V souladu s *kapitolou 5.1* budeme měnit hodnotu R_{S1} (R_{S2}) v náhradním schématu na *obrázku 5.1 a 5.2*, tedy při uvažování frekvenční závislosti prvků $R_{E,f}$, $L_{E,f}$ a bez uvažování frekvenční závislosti prvků R_E a L_E .

V *příloze 2* jsou na obrázku *P-2.11 až P-2.14* grafy frekvenční závislosti chyby převodu přístrojového indukčního transformátoru napětí při proměnné frekvenci (pokud bylo sledované frekvenční pásmo do 5kHz zkráceno je to z důvodu neproměnnosti chyby převodu v tomto intervalu), proměnné hodnotě R_{S1} (R_{S2}) (v mezích -40% až +40%).

Na *obrázku P-2.15 až P-2.18* jsou grafy frekvenční závislosti chyby úhlu přístrojového indukčního transformátoru napětí při proměnné frekvenci, proměnné hodnotě R_{S1} (R_{S2}) (v mezích -40% až +40%).

Dílčí závěr

Změna hodnoty prvku R_{S1} (R_{S2}) nemá vliv na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu ve sledované frekvenční oblasti.

5.4.4. Vliv změny hodnoty prvku L_{S1} (L_{S2}) na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu

V souladu s *kapitolou 5.1* budeme měnit hodnotu prvku L_{S1} (L_{S2}) v náhradním schématu na *obrázku 5.1 a 5.2*, tedy při uvažování frekvenční závislosti prvků $R_{E,f}$ $L_{E,f}$ a bez uvažování frekvenční závislosti prvků R_E a L_E .

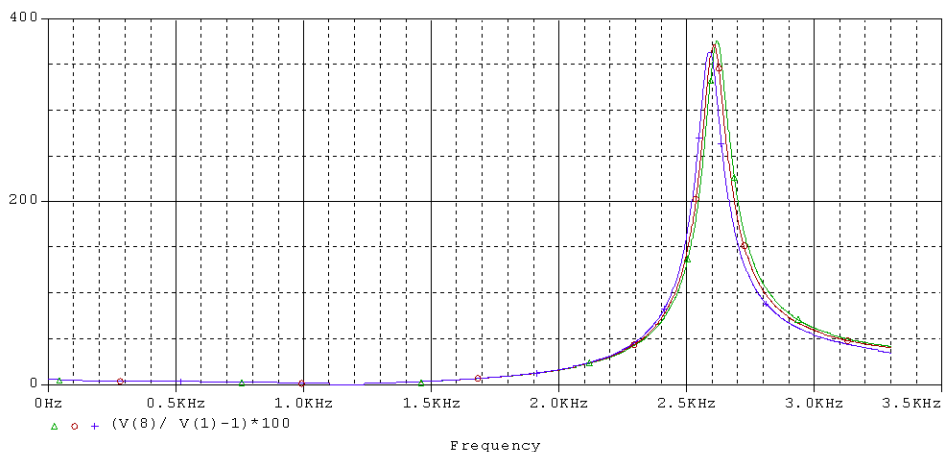
Na *obrázku 5.12 až 5.15* jsou grafy frekvenční závislosti chyby převodu přístrojového indukčního transformátoru napětí při proměnné frekvenci (pokud bylo sledované frekvenční pásmo do 5kHz zkráceno je to z důvodu neproměnnosti chyby převodu v tomto intervalu), proměnné hodnotě L_{S1} (L_{S2}) (v mezích -40% až +40%) .

Na *obrázku 5.15 až 5.19* jsou grafy frekvenční závislosti chyby úhlu přístrojového indukčního transformátoru napětí při proměnné frekvenci, proměnné hodnotě prvku L_{S1} (L_{S2}) (v mezích -40% až +40%).

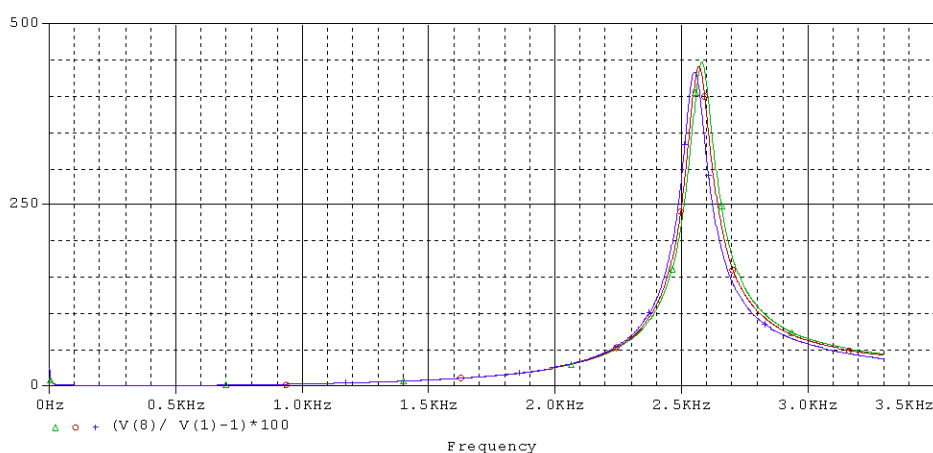
Dílčí závěr

Se zvyšující se frekvencí klesá hodnota prvku L_{S1} (L_{S2}). Změna hodnoty prvku L_{S1} (L_{S2}) ovlivňuje frekvenční závislost chyby převodu a úhlu, což je zřejmé z *obrázků 5.12 a 5.13* (chyba převodu) a *obrázků 5.16 a 5.17* (chyba úhlu).

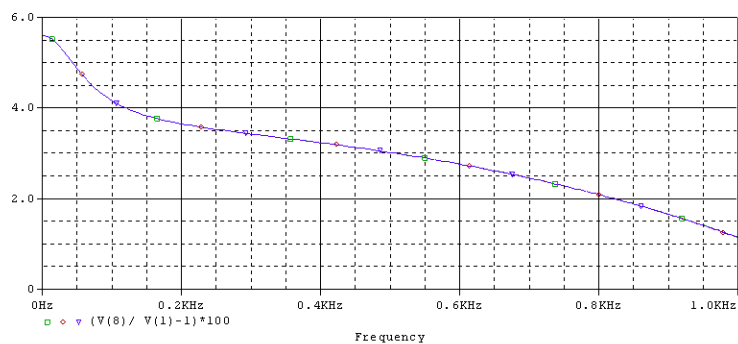
Změna hodnoty prvku L_{S1} (L_{S2}) má vliv ve sledované frekvenční oblasti na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu zejména v okolí frekvence 2,6kHz. Mimo okolí této frekvence změna hodnoty L_{S1} (L_{S2}) nemá ve frekvenční oblasti do 5kHz vliv na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu, což je zřejmé z *obrázku 5.14 a 5.15* (chyba převodu) a *obrázků 5.18 a 5.19* (chyba úhlu).



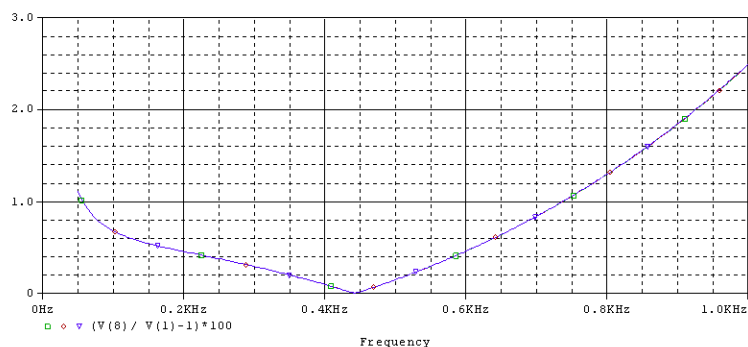
Obr. 5.12 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna L_{S1} (L_{S2}), L_E a R_E fr. nezávislé



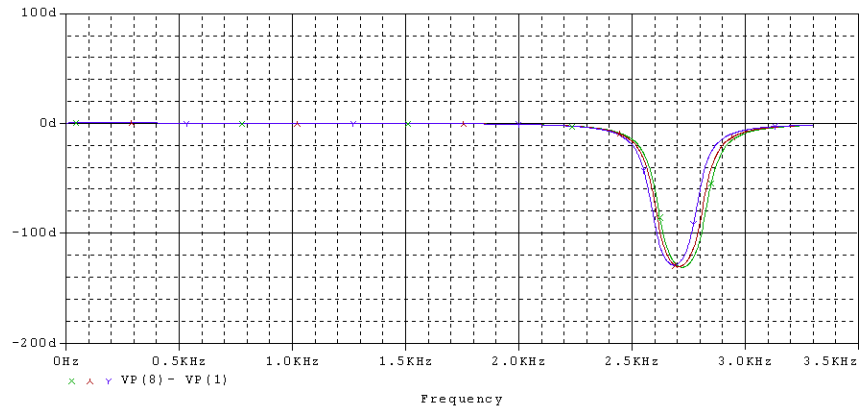
Obr. 5.13 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna L_{S1} (L_{S2}), L_E a R_E fr. závislé



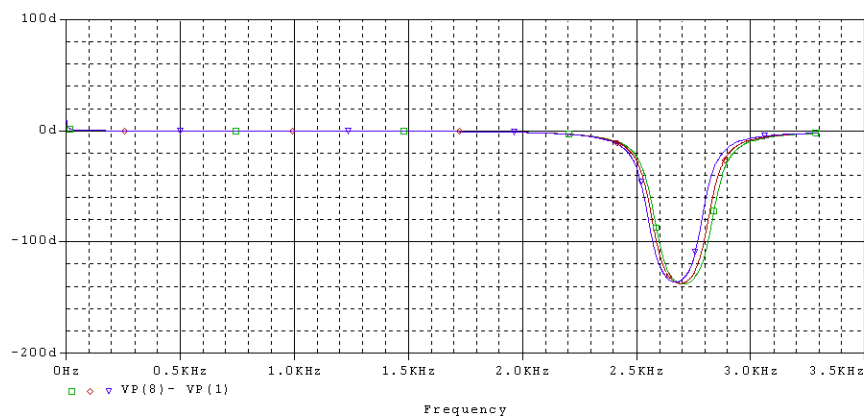
Obr. 5.14 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna L_{S1} (L_{S2}), L_E a R_E fr. nez. (detail)



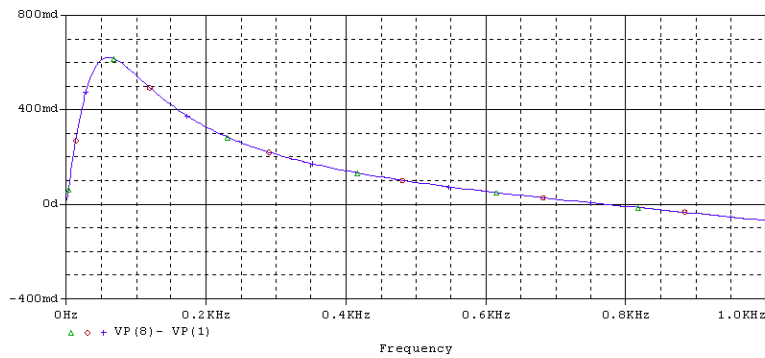
Obr. 5.15 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna L_{S1} (L_{S2}), L_E a R_E fr. nez. (detail)



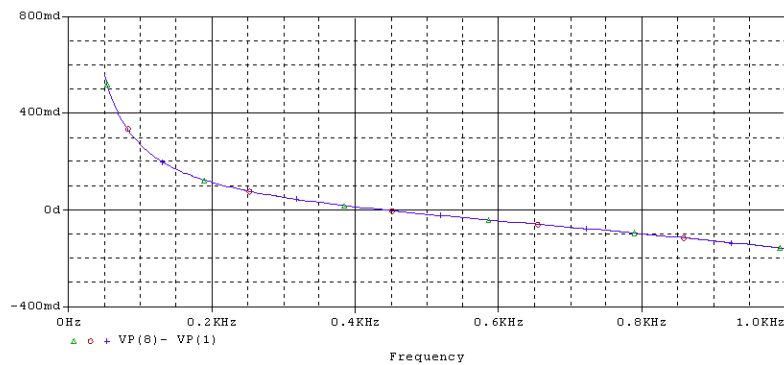
Obr. 5.16 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna L_{S1} (L_{S2}), L_E a R_E frekv. nezávislé



Obr. 5.17 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna L_{S1} (L_{S2}), L_E a R_E frekvenčně závislé



Obr. 5.18 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna L_{S1} (L_{S2}), L_E a R_E fr. nezávislé (detail)



Obr. 5.19 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna L_{S1} (L_{S2}), L_E a R_E fr. závislé (detail)

5.4.5. Vliv změny hodnoty prvku C_{PB} na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu

V souladu s *kapitolou 5.1* budeme měnit hodnotu prvku C_{PB} v náhradním schématu na *obrázku 5.1 a 5.2*, tedy při uvažování frekvenční závislosti prvků $R_{E,f}$ $L_{E,f}$ a bez uvažování frekvenční závislosti prvků R_E a L_E .

Na *obrázku P-2.19 až P-2.22* jsou grafy frekvenční závislosti chyby převodu přístrojového indukčního transformátoru napětí při proměnné frekvenci (pokud bylo sledované frekvenční pásmo do 5kHz zkráceno je to z důvodu neproměnnosti chyby převodu v tomto intervalu), proměnné hodnotě C_{PB} (v mezích -40% až +40%).

Na *obrázku P-2.23 až P-2.26* jsou grafy frekvenční závislosti chyby úhlu přístrojového indukčního transformátoru napětí při proměnné frekvenci, proměnné hodnotě C_{PB} (v mezích -40% až +40%).

Dílčí závěr

Změna hodnoty prvku C_{PB} nemá vliv na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu ve sledované frekvenční oblasti

5.4.6. Vliv změny hodnoty prvku C_{PS1} (C_{PS2}) na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu

V souladu s *kapitolou 5.1* budeme měnit hodnotu prvku C_{PS1} v náhradním schématu na *obrázku 5.1 a 5.2*, tedy při uvažování frekvenční závislosti prvků $R_{E,f}$ $L_{E,f}$ a bez uvažování frekvenční závislosti prvků R_E a L_E .

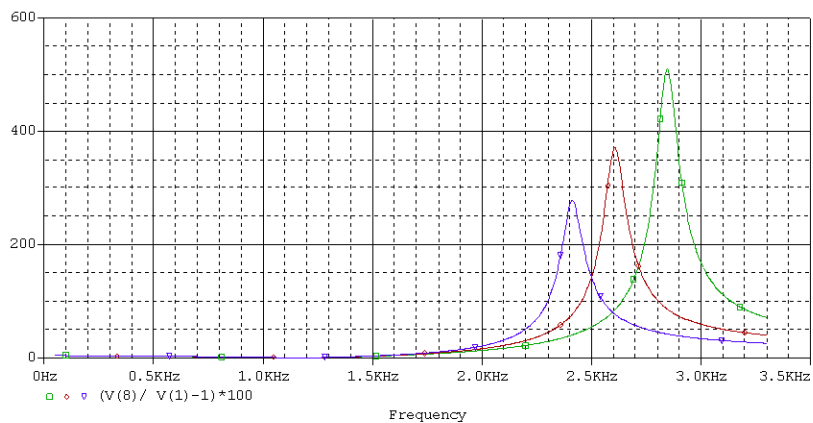
Na *obrázku 5.20 až 5.23* jsou grafy frekvenční závislosti chyby převodu přístrojového indukčního transformátoru napětí při proměnné frekvenci (pokud bylo sledované frekvenční pásmo do 5kHz zkráceno je to z důvodu neproměnnosti chyby převodu v tomto intervalu), proměnné hodnotě prvku C_{PS1} (v mezích -40% až +40%).

Na *obrázku 5.24 až 5.27* jsou grafy frekvenční závislosti chyby úhlu přístrojového indukčního transformátoru napětí při proměnné frekvenci, proměnné hodnotě C_{PS1} (v mezích -40% až +40%).

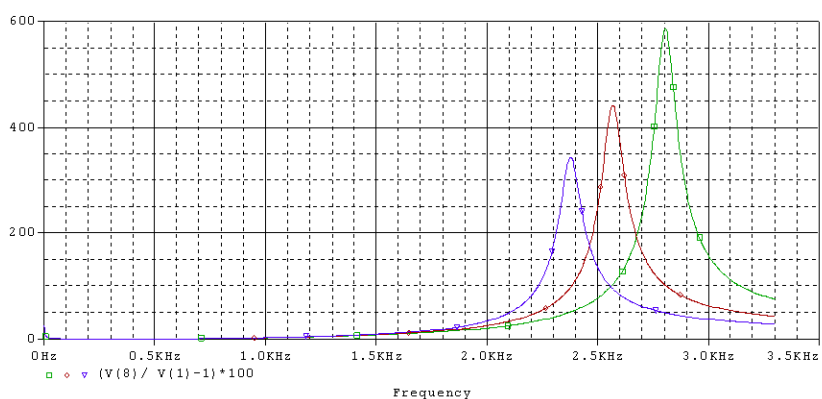
Dílčí závěr

Změna hodnoty prvku C_{PS1} (C_{PS2}) má druhý největší vliv ve sledované frekvenční oblasti na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu v celém náhradním schématu, což je zřejmé z *obrázku 5.20 a 5.21* (chyba převodu) a *5.24 a 5.25* (chyba úhlu).

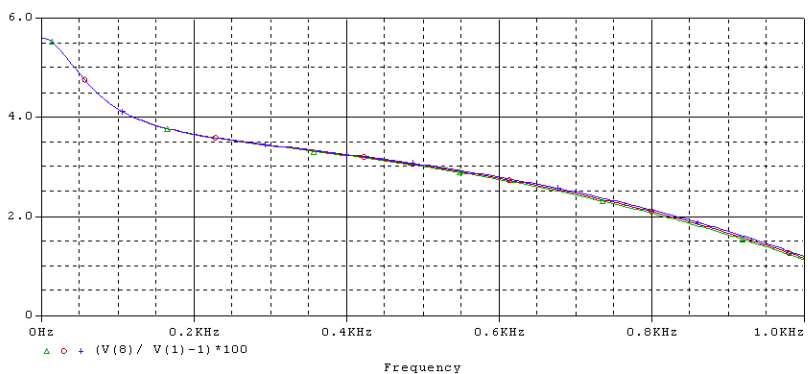
Ve frekvenční oblasti nad 2kHz má změna hodnoty prvku C_{PS1} (C_{PS2}) výrazný vliv na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu. Ve frekvenčním pásmu do 1kHz se vliv změny hodnoty C_{PS1} a C_{PS2} na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu výrazně neprojevuje.



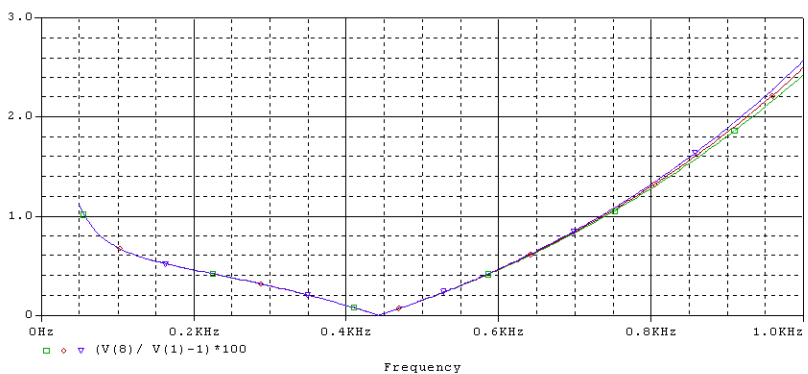
Obr. 5.20 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna C_{PS1} (C_{PS2}), L_E a R_E fr. nezávislé



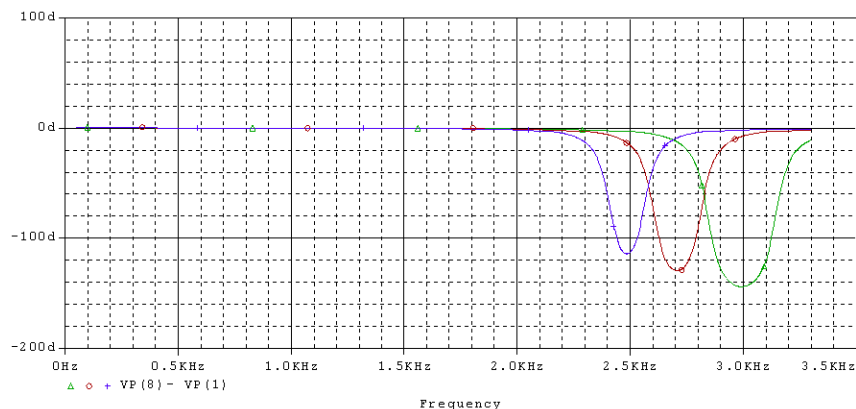
Obr. 5.21 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna C_{PS1} (C_{PS2}), L_E a R_E frekv. závislé



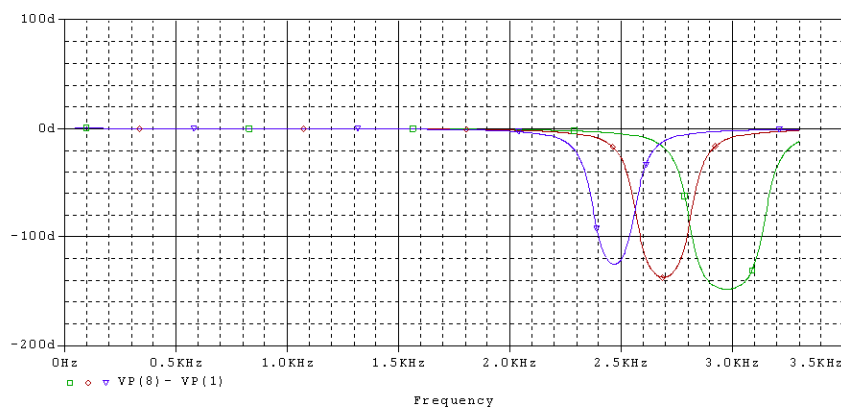
Obr. 5.22 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna C_{PS1} (C_{PS2}), L_E a R_E fr. nez. (detail)



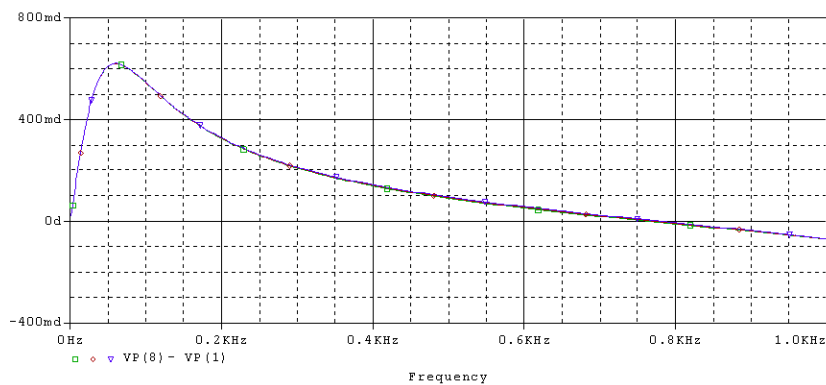
Obr. 5.23 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna C_{PS1} (C_{PS2}), L_E a R_E fr. záv. (detail)



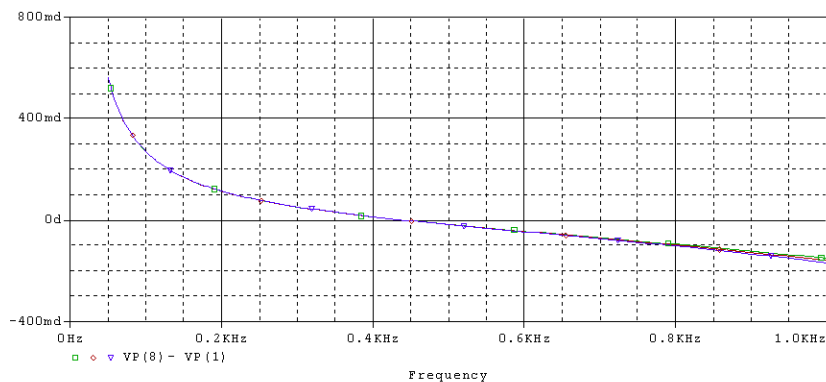
Obr. 5.24 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna C_{PS1} (C_{PS2}), L_E a R_E frekv. nezávislé



Obr. 5.25 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna C_{PS1} (C_{PS2}), L_E a R_E frekv. závislé



Obr. 5.26 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna C_{PS1} (C_{PS2}), L_E a R_E fr. nez. (detail)



Obr. 5.27 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna C_{PS1} (C_{PS2}), L_E a R_E fr. závislé (detail)

5.4.7. Vliv změny hodnoty prvku C_{S1S2} na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu

V souladu s *kapitolou 5.1* budeme měnit hodnotu prvku C_{S1S2} v náhradním schématu na *obrázku 5.1 a 5.2*, tedy při uvažování frekvenční závislosti prvků $R_{E,f}$ $L_{E,f}$ a bez uvažování frekvenční závislosti prvků R_E a L_E .

Na *obrázku P-2.27 až P-2.30* jsou grafy frekvenční závislosti chyby převodu přístrojového indukčního transformátoru napětí při proměnné frekvenci (pokud bylo sledované frekvenční pásmo do 5kHz zkráceno je to z důvodu neproměnnosti chyby převodu v tomto intervalu), proměnné hodnotě prvku C_{S1S2} (v mezích -40% až +40%).

Na *obrázku P-2.31 až P-2.34* jsou grafy frekvenční závislosti chyby úhlu přístrojového indukčního transformátoru napětí při proměnné frekvenci, proměnné hodnotě prvku C_{S1S2} v mezích (-40% až +40%).

Dílčí závěr

Změna hodnoty prvku C_{S1S2} nemá vliv na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu ve sledované frekvenční oblasti

5.5. Vliv reálného vnějšího břemene na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu

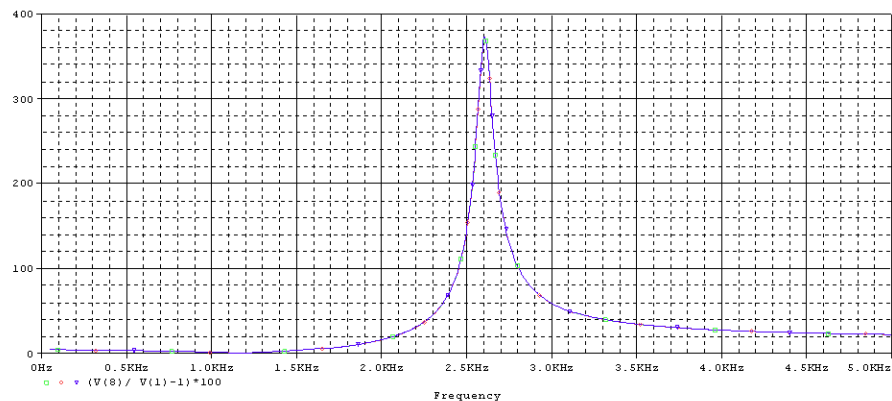
Vnější břemeno druhého sekundárního vinutí pro jistění bude mít nadále hodnotu 1T Ω . Vnější břemeno prvního sekundárního vinutí se skládá z paralelní kombinace parazitní kapacity C_{S1B} , kapacity přívodní kabeláže C_{KAB} (nutno přepočítat hodnotu kapacity na primární stranu podle *vzorce 4.1*) a impedance elektroměru (sériově řazené R_{EL} a L_{EL} nebo sériově řazené R_{EL} a C_{EL} - hodnoty nutno přepočítat na primární stranu podle *vzorce 4.1*).

Kapacita kabelu bude měněna 0,5 μ F – 1 μ F – 1,5 μ F (nutno přepočítat hodnotu kapacity na primární stranu podle *vzorce 4.1*), což pokrývá většinu případů délky kabeláží mezi přístrojovým indukčním transformátorem a statickým elektroměrem v rozvodnách 110kV, TNS 25kV, 50Hz.

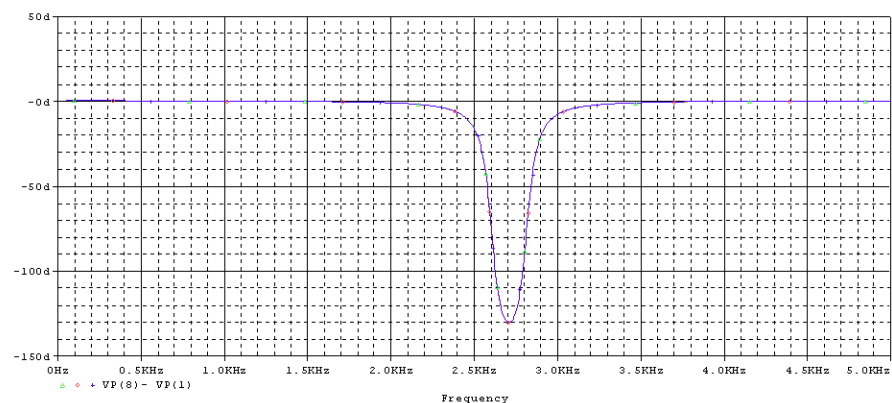
Pro výzkum vlivu vnějšího břemene na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu použijeme statický elektroměr Moeller KWZ-3PH-xxx (viz *tabulka 4.2*), který představuje odporově-kapacitní zátěž ($R_{EL} = 625\Omega$ a $C_{EL} = 465nF$) a statický elektroměr Landys a Gyr ZMD 400AT/CT (viz *tabulka 4.2*), který představuje odporově-indukční zátěž ($R_{EL} = 2930\Omega$ a $L_{EL} = 20,6H$). Tyto hodnoty se přepočítají na prim. stranu podle *vzorce 4.1* včetně kapacity kabeláže.

Dílčí závěr

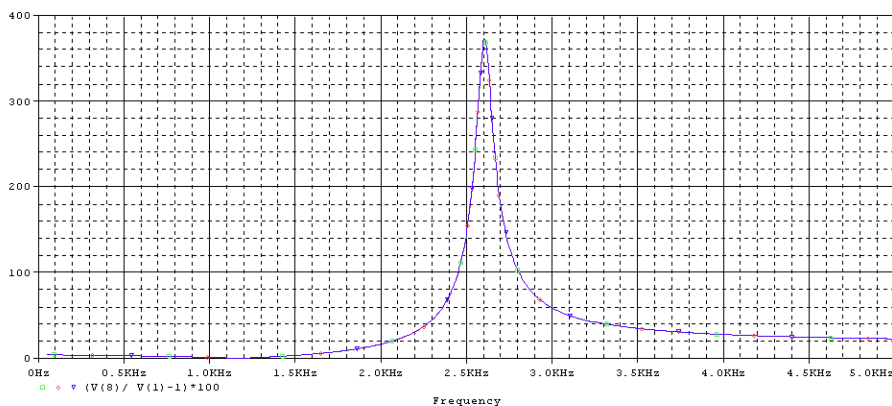
Statický elektroměr a k němu paralelně řazená kapacita kabeláže, jejíž hodnota je měněna v širokém rozsahu nemá vliv na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojového indukčního transformátoru napětí.



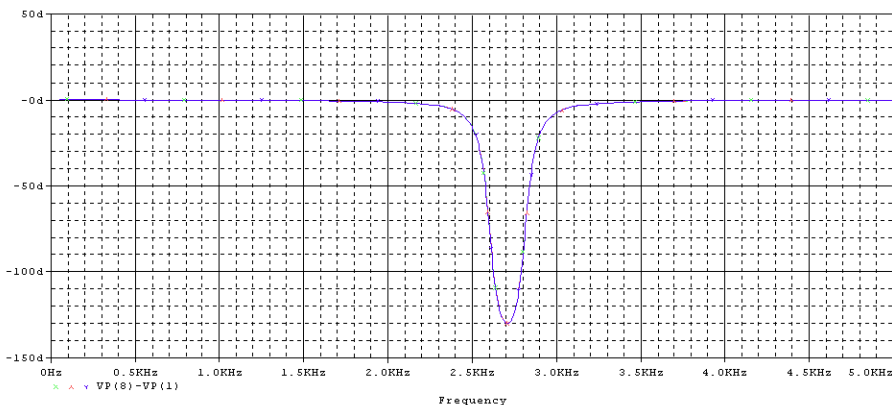
Obrázek 5.28 – Vliv vnějšího břemene (ZMD) na fr. závislost chyby převodu, při změně C_{KAB} .



Obrázek 5.29 - Vliv vnějšího břemene (ZMD) na fr. závislost chyby úhlu, při změně C_{KAB} .



Obrázek 5.28 – Vliv vnějšího břemene (KWZ) na fr. závislost chyby převodu, při změně C_{KAB}



Obrázek 5.29 - Vliv vnějšího břemene (KWZ) na fr. závislost chyby úhlu, při změně C_{KAB} .

5.6. Frekvenční závislost chyby převodu a úhlu EMFC 145

Vliv změny hodnot prvků náhradního schématu na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu je popsán v *kapitole 5.4*.

Na *obrázku 5.28 až 5.31* je frekvenční závislost chyby převodu přístrojového indukčního transformátoru napětí EMFC 145 po dosazení hodnot prvků náhradního schématu (viz. *kapitola 5.2*) při uvažování prvků R_E , L_E frekvenčně nezávislých.

Na *obrázku 5.32 a 5.35* je frekvenční závislost chyby úhlu přístrojového indukčního transformátoru napětí EMFC 145 při uvažování prvků $R_{E,f}$, $L_{E,f}$ frekvenčně závislých.

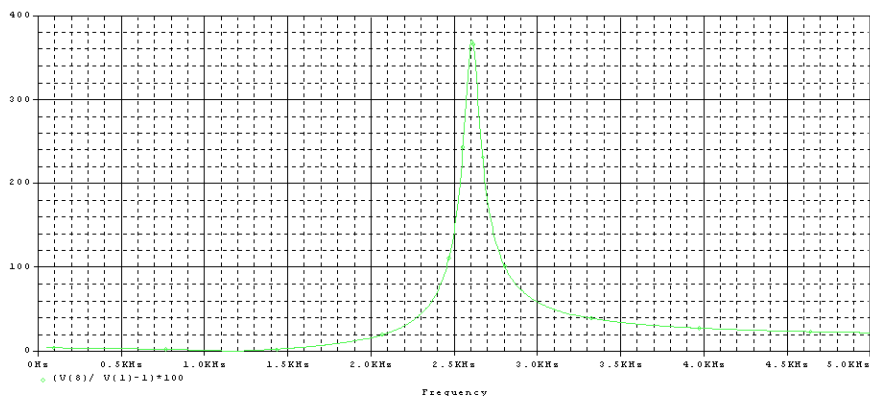
Dílčí závěr

Z *obrázku 5.28 a 5.32* je zřejmé, že uvažování frekvenční závislosti prvků magnetizační větve má výrazný vliv na změnu frekvenční závislosti chyby převodu. Uvažování frekvenční závislosti prvků magnetizační větve zvyšuje maximum chyby převodu, ale také ho posouvá směrem k nižším frekvencím.

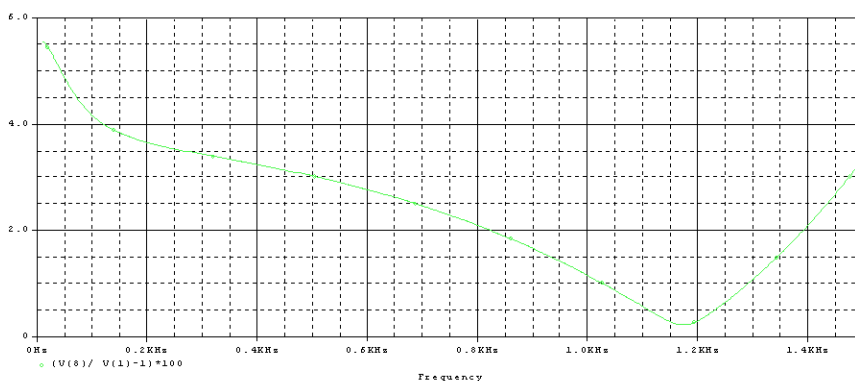
Z *obrázku 5.30 a 5.34* je zřejmé že uvažování frekvenční závislosti prvků magnetizační větve nemá výrazný vliv na změnu frekvenční závislosti chyby úhlu.

Z detailního *obrázku 5.29 a 5.33* je zřejmé, že uvažování frekvenční závislosti prvků magnetizační větve zapříčiní strmější nárůst chyby převodu, kdy chyba převodu překračuje 5% už od frekvence 1,3 kHz (viz *obrázek 5.33*).

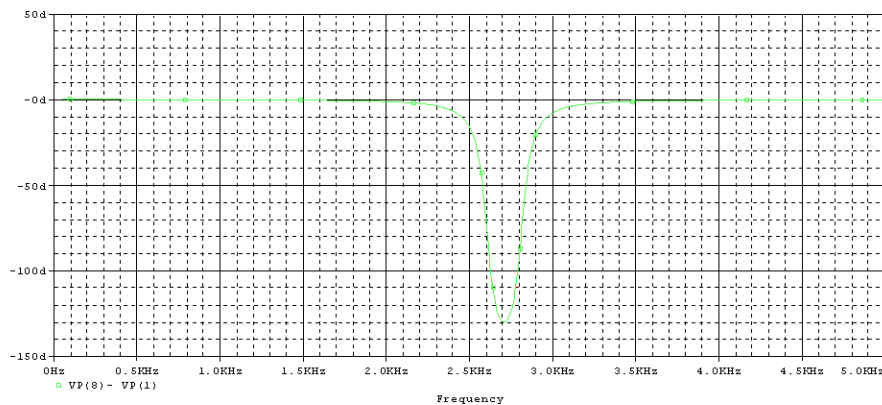
Z detailního *obrázku 5.31 a 5.35* je zřejmé, že uvažování frekvenční závislosti prvků magnetizační větve nemá výrazný vliv na změnu frekvenční závislosti chyby úhlu.



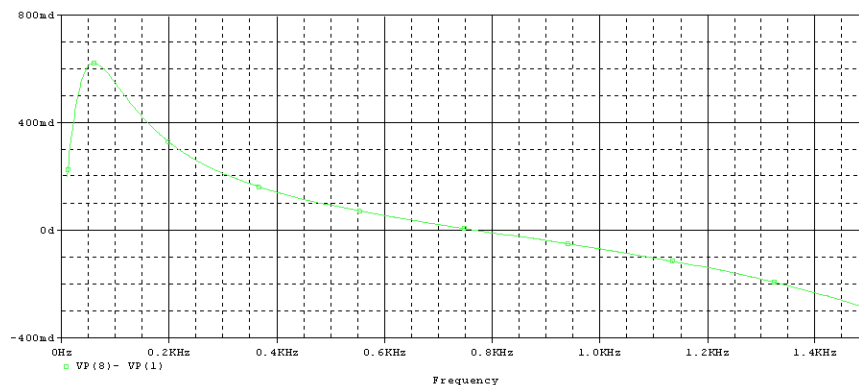
Obrázek 5.28 - Frekvenční závislost chyby převodu EMFC145, L_E , R_E frekv. nezávislé



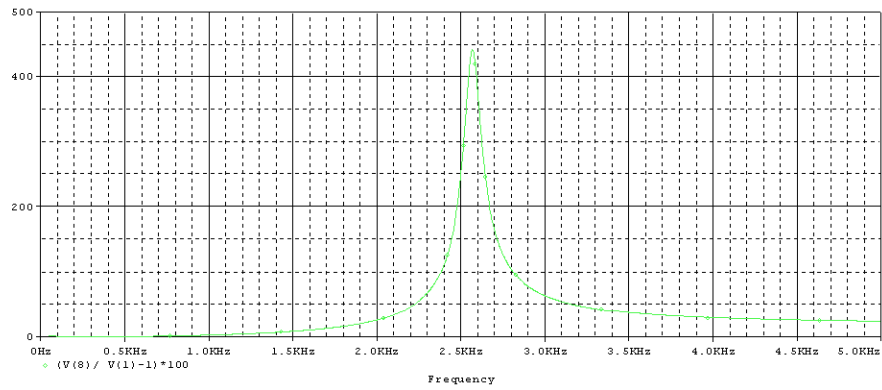
Obrázek 5.29 - Frekvenční závislost chyby převodu EMFC145, L_E , R_E frekv. nezávislé (detail)



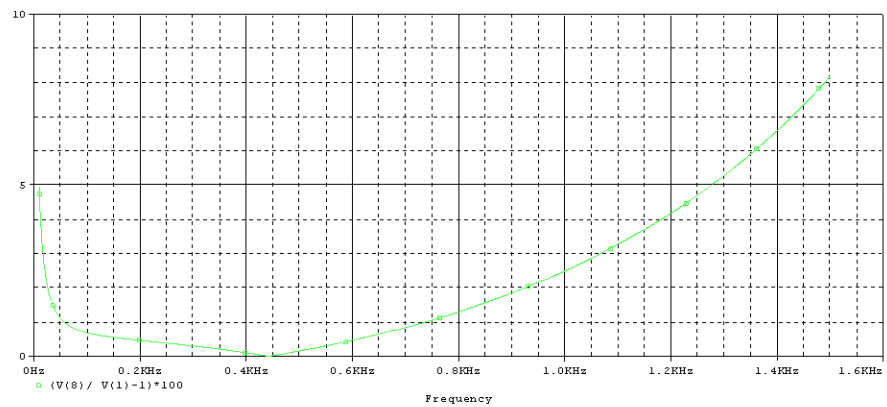
Obrázek 5.30 - Frekvenční závislost chyby úhlu EMFC145, L_E , R_E frekv. nezávislé



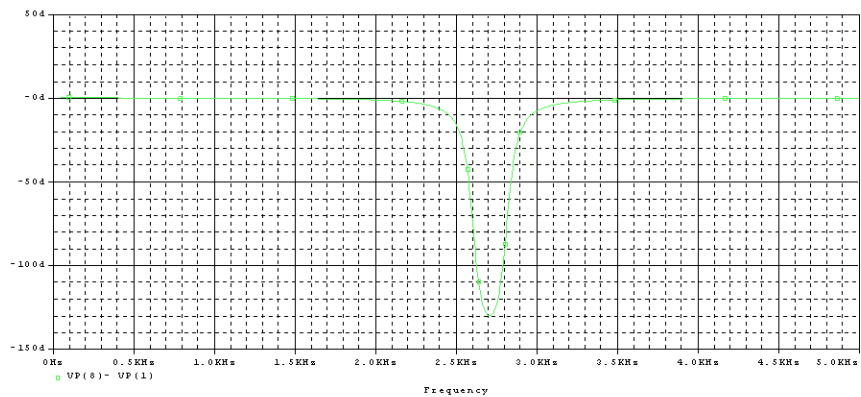
Obrázek 5.31 - Frekvenční závislost chyby úhlu EMFC145, L_E , R_E frekv. nezávislé (detail)



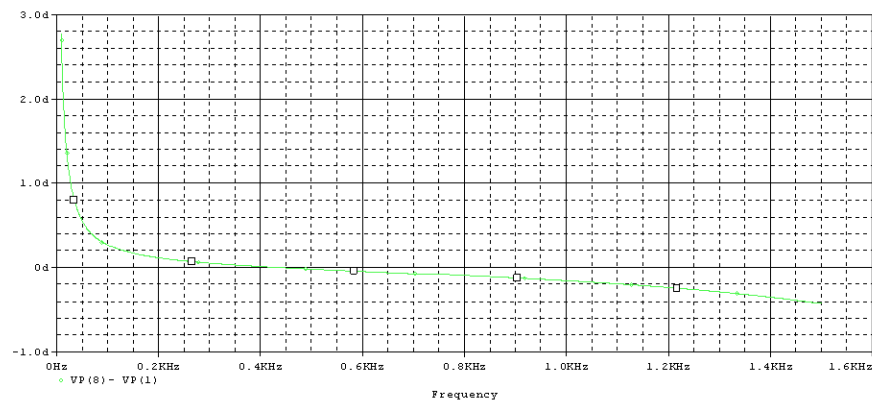
Obrázek 5.32 - Frekvenční závislost chyby převodu EMFC145, L_E , R_E frekv. závislé



Obrázek 5.33 - Frekvenční závislost chyby převodu EMFC145, L_E , R_E frekv. závislé (detail)



Obrázek 5.34 - Frekvenční závislost chyby úhlu EMFC145, L_E , R_E frekv. závislé



Obrázek 5.35 - Frekvenční závislost chyby úhlu EMFC145, L_E , R_E frekv. závislé (detail)

6. Závěry a doporučení

Práce přispěla k objasnění frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojových transformátorů s izolačním napětím 123kV, které se používají v rozvodnách 110kV TNS 25kV, 50Hz.

Jelikož dodavatel elektrické energie v připojovacích podmínkách stanoví, maximální procentní obsahy jednotlivých řádů harmonických lze předpokládat, že provádí i kontrolu splnění těchto mezí v připojovacím bodě TNS 25kV, 50Hz. Měření vstupních veličin napětí a proudu zajišťují v TNS 25kV, 50Hz přístrojové transformátory s izolačním napětím 123kV, které jsou umístěny v rozvodně 110kV. Jelikož fakturační měření elektrické energie podléhá zákonu o metrologii a přístrojový transformátor je měřidlem stanoveným lze předpokládat, že pro měření vedoucí ke kontrole splnění povolených mezí vyšších harmonických v připojovacím bodě budou platit stejné požadavky na přesnost měření jako pro fakturační měření.

Tato měření budou splňovat požadavky na přesnost, pokud budou měřeny proudové řády harmonických přístrojovým transformátorem proudu s izolačním napětím 123kV. Tento typ přístrojového transformátoru má frekvenčně nezávislou chybu převodu a úhlu ve sledované frekvenční oblasti do 5kHz. Maximální chyba převodu a úhlu stanovená v [10] pro třídu přesnosti $T_p=0,2$ nebude překročena (viz **obrázek 4.7** a **4.8**) ve sledované frekvenční oblasti do 5kHz. Tento poznatek by měl vést k doporučení, aby distributor elektrické energie stanovoval jednotně maximální přípustné meze proudových harmonických v připojovacím bodě TNS 25kV, 50Hz.

Popis frekvenční závislosti přístrojového kapacitního transformátoru napětí s izolačním napětím 123kV slouží jako podklad pro jednání s distributorem elektrické energie, pokud by pro měření napěťových harmonických v připojovacím bodě TNS 25kV, 50Hz požadoval přístrojový kapacitní transformátor napětí. Pro měření vyšších napěťových harmonických je tento typ přístrojového transformátoru zcela nevhodný, jelikož již v okolí frekvence jmenovité se projevuje frekvenční závislost chyby převodu a úhlu. V okolí jmenovité frekvence je pro třídu přesnosti $T_p=0,2$ překročena povolená chyba převodu a úhlu (viz **obrázek 4.18**) stanovená v [15].

Přístrojový transformátor napětí má ve sledovaném frekvenčním pásmu do 5kHz frekvenčně závislou chybu převodu a úhlu. Poznat závislost změny této frekvenční závislosti při změně hodnot prvků náhradního schématu a vnějšího břemene bylo hlavním cílem této práce. Provedené simulace určily, která prvky mají největší vliv na frekvenční závislost chyby převodu

a úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí. Přínos této práce je i v doplnění náhradního schématu přístrojového transformátoru napětí s izolačním napětím 123kV o frekvenční závislost prvků magnetizační větve. Toto doplnění umožnilo zkoumat vliv uvažování frekvenční závislosti prvků magnetizační větve na frekvenční závislost chyby převodu a úhlu. Simulace prokázaly, že uvažování frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí má ve sledovaném frekvenčním pásmu nezanedbatelný vliv na chybu převodu a úhlu. Práce prokázala, že největší vliv na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu mají zejména hodnoty primárních prvků přístrojového induktivního transformátoru napětí L_P (se stoupající hodnotou frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu klesá), R_P (se stoupající hodnotou frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu stoupá) a prvky magnetizační větve $L_{E,f}$ (se stoupající hodnotou frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu klesá), $R_{E,f}$ (se stoupající hodnotou frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu stoupá). Na základě porovnání výsledků grafů frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu při uvažování frekvenční závislosti prvků magnetizační větve a bez uvažování frekvenční závislosti prvků magnetizační větve je zřejmé, že takovéto zjednodušení (uvažování frekvenční nezávislosti prvků magnetizační větve) má značný vliv na získané průběhy (viz **obrázek 5.32 až 5.35**). Toto zjednodušení je tedy nutné odmítnout, protože nevystihuje skutečné chování feromagnetického obvodu přístrojového transformátoru napětí a i proto, že toto zjednodušení pak vnáší do výsledku simulací nezanedbatelnou chybu (viz **obrázek 5.4 až 5.35** a **obrázek P2.3 až P2.34**). Významný vliv na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu má i hodnota kapacity C_{PS} (se stoupající hodnotou frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu stoupá). Ostatní kapacity v náhradním schématu na **obrázku 5.2** (C_{PB} , C_{S1S2} , C_{S1B} , C_{S2B}) a prvky sekundární strany náhradního schématu přístrojového transformátoru napětí (L_{S1} , L_{S2} , R_{S1} , R_{S2}) nemají výrazný vliv na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu. Stejně tak vnější břemeno sekundárního vinutí v podobě různých typů statických elektroměrů a změny kapacity přívodních kabeláží v širokém rozsahu neprokázalo výrazný vliv na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí.

Frekvenční závislost chyby převodu a úhlu přístrojového induktivního transformátoru napětí způsobuje, že ve frekvenčním pásmu nad 2kHz (např. viz **obrázek 5.32** a **5.34** frekvence 2,55kHz povolená chyba převodu převyšuje maximální hodnotu povolenou v [14] 2500krát a chyba úhlu 750krát) bude maximální povolená mez chyby převodu a úhlu pro třídu přesnosti $T_P=0,2$ stanovená v [14] výrazně překročena, ve frekvenčním pásmu od 1,4kHz do 2kHz bude maximální povolená mez chyby převodu a úhlu překročena (viz **obrázek 5.32** a **5.34**) a ve

frekvenčním pásmu do 1,4kHz bude maximální povolená mez chyby převodu a úhlu splněna. Tento závěr, ale je nutné vždy prověřit ve vztahu k hodnotám prvků náhradního schématu konkrétního přístrojového indukčního transformátoru napětí, které mají vliv na změnu frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu (viz **obrázky 5.4 až 5.35** a **obrázek P2.3 až P2.34**).

Měření harmonických přístrojovými transformátory bude kromě frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojových transformátorů ovlivněno ještě dodatečnou chybou analyzátoru harmonických (statický elektroměr umí vyhodnocovat ze vstupních měřených hodnot napětí a proudu přístrojovými transformátory úrovně jednotlivých složek napěťových popř. proudových harmonických).

Navazující práce by mohla zde simulací získané grafy frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu přístrojového indukčního transformátoru napětí ověřit měřením na skutečném přístrojovém indukčním transformátoru napětí v rozvodně 110kV, TNS 25kV, 50Hz.

Navazující práce by také mohla zkoumat velikost dodatečné chyby analyzátoru harmonických v podobě statického elektroměru.

7. Použité zkratky

ČD, a.s.	České dráhy, akciová společnost
ČSN	Česká státní norma
ERÚ, s.o.	Energetický regulační úřad, státní organizace
EU	Evropská unie
FKZ	Filtračně-kompenzační zařízení
HDO	Hromadné dálkové ovládání
P	primární vinutí (primární strana)
PTN	Přístrojový indukivní transformátor napětí
S	sekundární vinutí (sekundární strana)
SŽDC, s.o.	Správa železniční dopravní cesty, státní organizace
SŽE, s.o.	Správa železniční energetiky, státní organizace
THD	Celkové harmonické zkreslení
TNS	Trakční napájecí stanice
TP	Třída přesnosti
TV	Trakční vedení

8. Seznam obrázků

Seznam obrázků v textové části disertační práce

- Obr. 2.1** - Příklad uspořádání TNS 25 kV, 50 Hz - Vranov
- Obr. 2.2** - Schéma připojení TNS 25kV, 50Hz k trakčnímu vedení – zapojení do T
- Obr. 2.3** - Schéma připojení TNS 25kV, 50Hz k trakčnímu vedení – zapojení do L
- Obr. 2.4** - FKZ dnešní koncepce [1]
- Obr. 3.1** - **a)** tyčový přístrojový transformátor proudu s uzavřeným feromagnetickým obvodem dole, **b)** tyčový přístrojový transformátor proudu s uzavřeným feromagnetickým obvodem nahoře [5]
- Obr. 3.2** - Řez tyčovým přístrojovým transformátorem proudu s uzavřeným feromagnetickým obvodem dole a nahoře [5]
- Obr. 3.3** - **a)** Příklad tyčového přístrojového transformátoru proudu pro venkovní použití s uzavřeným feromagnetickým obvodem dole **b)** řez tímto tyčovým přístrojovým transformátorem proudu [6]
- Obr. 3.4** - Uzavřený feromagnetický obvod přístrojového indukivního transformátoru napětí jádrového typu

- Obr. 3.5 - a)** - Příklad přístrojového induktivního transformátoru napětí s uzavřeným feromagnetickým obvodem pro venkovní použití **b)** řez tímto přístrojovým induktivním transformátorem napětí [7]
- Obr. 3.6 - a)** - Příklad přístrojového kapacitního transformátoru napětí pro venkovní použití, **b)** řez přístrojovým kapacitním transformátorem napětí [8]
- Obr. 3.7 -** Společné náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu a napětí s uzavřeným feromagnetickým obvodem platné v okolí jmenovité frekvence 50Hz a za předpokladu $N_P = N_S$
- Obr. 3.8 -** Vektorový diagram veličin společného náhradního schématu přístrojového transformátoru proudu a napětí s uzavřeným feromagnetickým obvodem za předpokladu $N_P = N_S$
- Obr. 3.9 -** Náhradní schéma přístrojového kapacitního transformátoru napětí s aktivním tlumícím obvodem platné v okolí jmenovité frekvence a za předpokladu $N_P = N_S$ [9]
- Obr. 3.10 -** Princip přístrojového transformátoru proudu [12]
- Obr. 3.11 -** Náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu platné v okolí jmenovité frekvence 50Hz a za předpokladu $N_P = N_S$
- Obr. 3.12 -** Vektorový diagram veličin náhradního schématu přístrojového transformátoru proudu za předpokladu $N_P = N_S$
- Obr. 3.13 -** Zjednodušené náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu platné v okolí jmenovité frekvence 50Hz a za předpokladu $N_P = N_S$
- Obr. 3.14 -** Závislost chyby převodu a úhlu přístrojového transformátoru proudu na primárním proudu při konstantním břemeni [12]
- Obr. 3.15 -** Závislost chyby převodu a úhlu přístrojového transformátoru proudu na vnějším břemeni (při $\beta_Z = \beta_i = \beta_C$) [12]
- Obr. 3.16 -** Ideální (1,2) a skutečné (3,4) nadproudové charakteristiky přístrojového transformátoru proudu [12]
- Obr. 3.17 -** Průběhy proudů a toků při zkratu
- Obr. 3.18 -** Nahoře: průběh primárního a sekundárního proudu (nízká hodnota celkového břemene). Dole: průběh primárního a sekundárního proudu (vyšší hodnota celkového břemene) [13]
- Obr. 3.19 -** Křivky saturace [13]
- Obr. 3.20 -** Chyba převodu a úhlu při saturaci feromagnetického obvodu [9]
- Obr. 3.21 -** Časová odezva přístrojového transformátoru proudu při saturaci feromagnetického obvodu a průběh sycení feromagn. obvodu [9]

- Obr. 3.22** - Náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí platné v okolí jmenovité frekvence 50Hz a za předpokladu $N_p = N_s$
- Obr. 3.23** - Vektorový diagram veličin náhradního schématu přístrojového induktivního transformátoru napětí za předpokladu $N_p = N_s$
- Obr. 3.24** - Náhradní schéma přístrojového kapacitního transformátoru napětí platné v okolí jmenovité frekvence 50Hz a za předpokladu $N_p=N_s$ [15]
- Obr. 3.25** - **a)** zapojení aktivního tlumícího zařízení a **b)** simulační model aktivního tlumícího zařízení [16]
- Obr. 3.26** - Náhradní schéma přístrojového kapacitního transformátoru napětí, s pasivním tlumícím zařízením, platné v okolí jmenovité frekvence 50Hz a za předpokladu $N_p=N_s$ [17]
- Obr. 3.27** - Komplexní diagram chyby převodu a úhlu přístrojového kapacitního transformátoru napětí při kolísání frekvence sítě [12]
- Obr. 3.28** - Odezva přístrojového kapacitního transformátoru napětí na přepětí [15]
- Obr. 4.1**- Náhradní schéma přístrojového transformátoru s dvěma sekundárními vinutími odvozené platné pro frekvence do 5kHz při respektování převodu
- Obr. 4.2** - Úplné náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu s dvěma sekundárními vinutími platné pro frekvence do 5kHz [24]
- Obr. 4.3** - Zjednodušené náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu platné pro frekvence do 5kHz
- Obr. 4.4** - Zjednodušené náhradní schéma přístrojového transformátoru proudu platné pro frekvence do 5kHz
- Obr. 4.5** - Průběh sycení feromagnetického obvodu přístrojového transformátoru. proudu
- Obr. 4.6** - Průběh sekundárního proudu při zkratu na primárním vinutí, **a)** výsledek simulace bez zahrnutí remanence feromagnetického obvodu do modelu **b)** výsledek simulace se zahrnutím remanence jádra do modelu [16]
- Obr. 4.7** - **a)** Frekvenční závislost chyby převodu, **b)** frekvenční závislost chyby úhlu [24]
- Obr. 4.8** - Frekvenční závislost chyby převodu transformátoru proudu [21]
- Obr. 4.9** - Úplné náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí s dvěma sekundárními vinutími, platné pro frekvence do 5kHz (100-tá harmonická)
- Obr. 4.10** - Zjednodušené náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí s dvěma sekundárními vinutími, platné pro frekvence do 5kHz (100-tá harmonická)
- Obr. 4.11** - Uvažované kapacity mezi vinutími a mezi vinutími a kostrou přístrojového induktivního transformátoru napětí

- Obr. 4.12* - Kapacita P-S1, odečtená z křivky získané impulsním testem [25]
- Obr. 4.13* - Spojení kapacit v přístrojovém induktivním transformátoru napětí na vysokých frekvencích
- Obr. 4.14* - Náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí 27,5kV platné pro frekvence do 100kHz [18]
- Obr. 4.15* - Průběh chyby převodu přístrojového induktivního transformátoru napětí s izolačním napětím 27,5kV [18]
- Obr. 4.16* - Průběh frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu při měření přístrojového induktivního transformátoru napětí na vyšších harmonických [25]
- Obr. 4.17* - Náhradní schéma přístrojového kapacitního transformátoru napětí platné pro frekvence do 10kHz [9]
- Obr. 4.18* - Frekvenční závislost chyby převodu a úhlu přístrojového kapacitního transformátoru napětí do frekvence 10kHz [9]
- Obr. 4.19* - Vliv změny hodnoty parametrů náhradního obvodu na průběh frekvenční závislosti chyb převodu a úhlu přístrojového kapacitního transformátoru napětí [16]
- Obr. 5.1* - Zjednodušené (sériové řazení R_E a L_E) náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí s dvěma sekundárními vinutími, platné pro frekvence do 5kHz (100-tá harmonická) – L_E , R_E frekvenčně nezávislé [25]
- Obr. 5.2* - Zjednodušené (sériové řazení R_E a L_E) náhradní schéma přístrojového induktivního transformátoru napětí s dvěma sekundárními vinutími, platné pro frekvence do 5kHz (100-tá harmonická) – L_E , R_E frekvenčně závislé [18,25]
- Obr. 5.3* - Prověření odvození hodnoty C_{PS1} z měřené hodnoty C_{12}
- Obr. 5.4* - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna** L_P , L_E a R_E frekv. nezávislé
- Obr. 5.5* - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna** L_P , L_E a R_E frekv. závislé
- Obr. 5.6* - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna** L_P , L_E a R_E frekv. nezávislé (detail)
- Obr. 5.7* - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna** L_P , L_E a R_E frekv. závislé (detail)
- Obr. 5.8* - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna** L_P , L_E a R_E frekvenčně nezávislé
- Obr. 5.9* - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna** L_P , L_E a R_E frekvenčně závislé
- Obr. 5.10* - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna** L_P , L_E a R_E frekv. nezávislé (detail)
- Obr. 5.11* - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna** L_P , L_E a R_E frekv. nezávislé (detail)
- Obr. 5.12* - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna** L_{S1} (L_{S2}), L_E a R_E fr. nezávislé
- Obr. 5.13* - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna** L_{S1} (L_{S2}), L_E a R_E fr. závislé
- Obr. 5.14* - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna** L_{S1} (L_{S2}), L_E a R_E fr. nez. (detail)

- Obr. 5.15* - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna L_{S1} (L_{S2})**, L_E a R_E fr. nez. (detail)
- Obr. 5.16* - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna L_{S1} (L_{S2})**, L_E a R_E frekv. nezávislé
- Obr. 5.17* - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna L_{S1} (L_{S2})**, L_E a R_E frekvenčně závislé
- Obr. 5.18* - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna L_{S1} (L_{S2})**, L_E a R_E fr. nezávislé (detail)
- Obr. 5.19* - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna L_{S1} (L_{S2})**, L_E a R_E fr. závislé (detail)
- Obr. 5.20* - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna C_{PS1} (C_{PS2})**, L_E a R_E fr. nezávislé
- Obr. 5.21* - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna C_{PS1} (C_{PS2})**, L_E a R_E frekv. závislé
- Obr. 5.22* - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna C_{PS1} (C_{PS2})**, L_E a R_E fr. záv. (detail)
- Obr. 5.23* - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna C_{PS1} (C_{PS2})**, L_E a R_E fr. záv. (detail)
- Obr. 5.24* - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna C_{PS1} (C_{PS2})**, L_E a R_E frekv. nezávislé
- Obr. 5.25* - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna C_{PS1} (C_{PS2})**, L_E a R_E frekv. závislé
- Obr. 5.26* - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna C_{PS1} (C_{PS2})**, L_E a R_E fr. nez. (detail)
- Obr. 5.27* - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna C_{PS1} (C_{PS2})**, L_E a R_E fr. závislé (detail)
- Obr. 5.28* - Frekvenční závislost chyby převodu EMFC145, L_E , R_E frekv. nezávislé
- Obr. 5.29* - Frekvenční závislost chyby převodu EMFC145, L_E , R_E frekv. nezávislé (detail)
- Obr. 5.30* - Frekvenční závislost chyby úhlu EMFC145, L_E , R_E frekv. nezávislé
- Obr. 5.31* - Frekvenční závislost chyby úhlu EMFC145, L_E , R_E frekv. nezávislé (detail)
- Obr. 5.32* - Frekvenční závislost chyby převodu EMFC145, L_E , R_E frekv. závislé
- Obr. 5.33* - Frekvenční závislost chyby převodu EMFC145, L_E , R_E frekv. závislé (detail)
- Obr. 5.34* - Frekvenční závislost chyby úhlu EMFC145, L_E , R_E frekv. závislé
- Obr. 5.35* - Frekvenční závislost chyby úhlu EMFC145, L_E , R_E frekv. závislé (detail)

Seznam obrázků v části příloh k disertační práci

- Obr. P-1.1* - Prověření odvození hodnoty C_{PS2} z měřené hodnoty C_{13}
- Obr. P-1.2* - Prověření odvození hodnoty C_{S1S2} z měřené hodnoty C_{23}
- Obr. P-1.3* - Prověření odvození hodnoty C_{PB} z měřené hodnoty C_{14}
- Obr. P-1.4* - Prověření odvození hodnoty C_{S1B} z měřené hodnoty C_{24}
- Obr. P-1.5* - Prověření odvození hodnoty C_{S2B} z měřené hodnoty C_{34}
- Obr. P-2.1* - Model PTN bez uvažování frekvenční závislosti R_E , L_E
- Obr. P-2.2* - Model PTN bez uvažování frekvenční závislosti R_E , L_E
- Obr. P-2.3* - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna R_P** , L_E a R_E frekvenčně nezávislé
- Obr. P-2.4* - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna R_P** , L_E a R_E frekv. závislé

Obr. P-2.5 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna R_{P, L_E} a R_E** frekv. nezávislé (detail)

Obr. P-2.6 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna R_{P, L_E} a R_E** frekv. závislé (detail)

Obr. P-2.7 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna R_P, L_E a R_E** frekvenčně nezávislé

Obr. P-2.8 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna R_P, L_E a R_E** frekv. závislé

Obr. P-2.9 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna R_{P, L_E} a R_E** frekv. nezávislé (detail)

Obr. P-2.10 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna R_{P, L_E} a R_E** frekv. závislé (detail)

Obr. P-2.11 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna $R_{S1} (R_{S2}), L_E$ a R_E** fr. nezávislé

Obr. P-2.12 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna $R_{S1} (R_{S2}), L_E$ a R_E** fr. závislé

Obr. P-2.13 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna $R_{S1}(R_{S2}), L_E$ a R_E** fr. nez. (detail)

Obr. P-2.14 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna $R_{S1}(R_{S2}), L_E$ a R_E** fr. záv. (detail)

Obr. P-2.15 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna $R_{S1} (R_{S2}), L_E$ a R_E** fr. nezávislé

Obr. P-2.16 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna $R_{S1} (R_{S2}), L_E$ a R_E** fr. závislé

Obr. P-2.17 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna $R_{S1}(R_{S2}), L_E$ a R_E** fr. nez. (detail)

Obr. P-2.18 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna $R_{S1}(R_{S2}), L_E$ a R_E** fr. záv. (detail)

Obr. P-2.19 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna C_{PB}, L_E a R_E** frekv. nezávislé

Obr. P-2.20 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna C_{PB}, L_E a R_E** frekv. závislé

Obr. P-2.21 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna C_{PB, L_E} a R_E** fr. nezávislé (detail)

Obr. P-2.22 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna C_{PB}, L_E a R_E** fr. závislé (detail)

Obr. P-2.23 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna C_{PB}, L_E a R_E** frekv. nezávislé

Obr. P-2.24 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna C_{PB}, L_E a R_E** frekv. závislé

Obr. P-2.25 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna C_{PB}, L_E a R_E** fr. nezávislé (detail)

Obr. P-2.26 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna C_{PB}, L_E a R_E** frekv. závislé (detail)

Obr. P-2.27 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna C_{S1S2}, L_E a R_E** frekv. nezávislé

Obr. P-2.28 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna C_{S1S2}, L_E a R_E** frekv. závislé

Obr. P-2.29 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna C_{S1S2}, L_E a R_E** fr. nez. (detail)

Obr. P-2.30 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, **změna C_{S1S2}, L_E a R_E** fr. nez. (detail)

Obr. P-2.31 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna C_{S1S2}, L_E a R_E** frekv. nezávislé

Obr. P-2.32 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna C_{S1S2}, L_E a R_E** frekv. závislé

Obr. P-2.33 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna C_{S1S2}, L_E a R_E** fr. nezávislé (detail)

Obr. P-2.34 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, **změna C_{S1S2}, L_E a R_E** fr. nezávislé (detail)

9. Seznam tabulek

- Tab. 3.1* - Dovolené chyby převodu a úhlu měřících transformátorů proudu [10]
- Tab. 3.2* - Dovolené chyby převodu a úhlu pro měřící transf. proudu pro zvláštní použití [10]
- Tab. 3.3* - Dovolené chyby převodu pro měřící transformátor proudu (třídy 3 a 5) [10]
- Tab. 3.4* - Dovolené chyby převodu a úhlu pro jisticí transformátory proudu třídy PR [10]
- Tab. 3.5* - Dovolené chyby převodu a úhlu přístrojových induktivních měřících transformátorů napětí [14]
- Tab. 3.6* - Dovolené chyby převodu a úhlu pro přístrojové induktivní jisticí transformátory napětí [14]
- Tab. 3.7* - Normalizované hodnoty tříd přechodových charakteristik [15]
- Tab. 3.8* - Meze chyb převodu a úhlu pro přístrojové kapacitní měřící transf. napětí [15]
- Tab. 3.9* - Rozsahy břemene pro zkoušky břemene [15]
- Tab. 3.10* - Meze chyb převodu a úhlu pro přístrojové kapacitní jisticí transformátory napětí [15]
- Tab. 4.1* - Přehled vlastností několika typů statických elektroměrů pro nepřímé měření [11]
- Tab. 4.2* - Přehled jednotlivých prvků impedance [11]
- Tab. 4.1* - Hodnoty získané měřením naprázdno a nakrátko [25]
- Tab. 4.2* - Výpočet prvků podélné větve náhradního schématu přístrojového induktivního transformátoru napětí [25]
- Tab. 4.3* - Výpočet prvků příčné větve náhradního schématu přístrojového induktivního transformátoru napětí [25]
- Tab. 4.4* - Měřené a vypočítané hodnoty kapacit přístrojového induktivního transformátoru napětí [25]

10. Seznam příloh

Příloha P-1 - Ověření měřených hodnot kapacit z tabulky 4.4 pomocí kapacit spočítaných

Příloha P-2 - Výzkum změny hodnot prvků náhradního obvodu na chybu převodu a úhlu

11. Literatura

- [1] HLAVA, Karel. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) drážních zařízení*. Pardubice: UPa DFJP, 2004. 116s. ISBN 80-7194-637-0.
- [2] VDEW,3. *Grundsätze für Beurteilung von Netzruckwirkungen*. Berlín: VDEW. 1992. 83s.

- [3] ČSN EN 50160 ed.2. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě*. Praha: ÚNMZ, 2008. 20s. Třídící znak 330122.
- [4] HLAVA, Karel. *Studie vlivu nových kritérií EMC TT Veselí nad Lužnicí*. Praha: SUDOP, 2009, 19s.
- [5] KNUT, Sjovall. *Instrument transformers – Application guide*. Sweden: ABB, 2009. 127s.
- [6] ABB. *Outdoor instrument transformer – buyers guide*. Sweden: ABB, 2009. 68s.
- [7] ABB. *Instrument transf. for outdoor applications up to 800kV*. Sweden: ABB, 2009. 10s.
- [8] Trench. *Capacitor voltage transformer*. Canada: Trench, 2006. 7s.
- [9] SEL. *Power system instrument transformers*. Schweiz: Schweizer engineering laboratories, 2005. 82s.
- [10] ČSN EN 60044-1. *Přístrojové transformátory - část 1: Transformátory proudu*. Praha: ÚNMZ, 2001. 44s. Třídící znak 351358.
- [11] VYDRŽAL, Tomáš. *Měření harmonických v sítích vn a vvn*. Pardubice: UPa DFJP. 2008. 60s. Diplomová práce na Dopravní fakultě Jana Pernera na katedře elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě. Vedoucí diplomové práce HLAVA Karel.
- [12] KOPEČEK, Jan - DVOŘÁK, Miloš. *Přístrojové transformátory (měřicí a jistící)*. Praha: Academia, 1966. 480s.
- [13] KEZUNOVIC, Mladen. *Performance assessment of advanced digital measurement and protection systems*. Texas: PSERC Texas University, 2006. 67s.
- [14] ČSN EN 60044-2. *Přístrojové transformátory - část 2: Induktivní transformátory napětí*. Praha: ÚNMZ, 2001. 44s. Třídící znak 351358.
- [15] ČSN EN 60044-5. *Přístrojové transformátory - část 5: Kapacitní transformátory napětí*. Praha: ÚNMZ, 2005. 68s. Třídící znak 351358.
- [16] TZIOUVARAS, Demetrios A. et al.. *Mathematical model for current, voltage, and coupling capacitor voltage transformers*. USA: IEEE Transaction, 2000. Vol.15. No.1. 62-72s. ISSN 0885-8977.
- [17] MELIOPOULOS, A.P. et al.. *Synchrophasor measurement accuracy characterization*. USA: Inertim report, 2007. 62s.
- [18] 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.
- [19] HLAVA, Karel. *Optimalizace přenosu energie v elektrické trakci*. Praha: VÚŽ Praha, VVO 6, 1986. 75s.

- [20] GRYM – BOCHMAN – MACHOŇ – CHMELÍK – HANUŠ - TOMAN. *Chránění III*. Praha: IRIS, 2007. 280s.
- [21] SAMESIMA, Itsuo Milton - OLIVIERA, José Carlos - DIAS, Mário Eduardo. *Frequency response analysis and modeling of measurement transformers under distorted current and voltage supply*. USA: IEEE Transactions, 1991. Vol. 6. No.4. 1762-1768s. ISSN 0885-8977.
- [22] BAK-JENSEN, Jesper - BAK-JENSEN, Birgitte - MIKKELSEN, Damsgaard Soren - JENSEN, Georg Carsten. *Parametric identification in potential transformer modeling*. USA: IEEE Transactions, 1992. Vol.7 No.1. 70-76s. ISSN 0885-8977.
- [23] SOLIMAN,S.A.- EL-ARINI, Mahdi M.- AL-KANDARI, A.M.- EL-HAWARY, M.E. *Frequency domain parameter identification of harmonic potential transformer models using least square techniques*.USA: Electric power system research, 1995. Vol.35. 45-49s, ISSN 0378-7796.
- [24] ELHAFFAR, Abdelsalam - LEHTONEN, Matti. *High frequency current modeling for traveling waves detection*. USA: IEEE, 2007. 6s. ISSN 1-4244-1298-6.
- [25] IMRIŠ, Peter - LEHTONEN, Matti. *Modelling of a voltage transformer for transients*. USA: IEEE Xplore, 2009. 5s.
- [26] ABB. *Instrument transformers – Technical information and application guide*. USA: ABB, 2004: 40s.
- [27] FRICKE, Lutz - KEGEL, Reinhard. *Simulation von induktiven 110kV und 220-kV Hochspannungswandlern*. Deutschland: etzArchiv, 1990. 6s.
- [28] SELJESETH, Helge – SEATHRE, Evald – OHNSSTAD, M. Trond – LIEN, Ingebjorg. *Voltage transformer frequency response. Measuring harmonics in Norwegian 300 kV and 132 kV power systems*. USA: IEEE, 1998. 820-824. ISSN 0-7803-5105-3.
- [29] ISLAM, Mofizul Syed - COATES, M. Kathryn - LEDWICH, Gerard. *Identification of high frequency transformer equivalent circuit using Matlab from frequency domain data*. USA: IEEE, 1997. 357-364. ISSN 0-7803-4067-1.

Přehled vlastních publikovaných prací související s problematikou disertace

- [30] SATORI, Michal. *Frekvenční závislost chyby převodu a úhlu přístrojových transformátorů s izolačním napětím 123kV v rozvodnách 110kV, trakčních napájecích stanic 25kV, 50Hz*. Pardubice: UPa DFJP, 2010. 10s. ISBN 978-80-7395-237-2

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

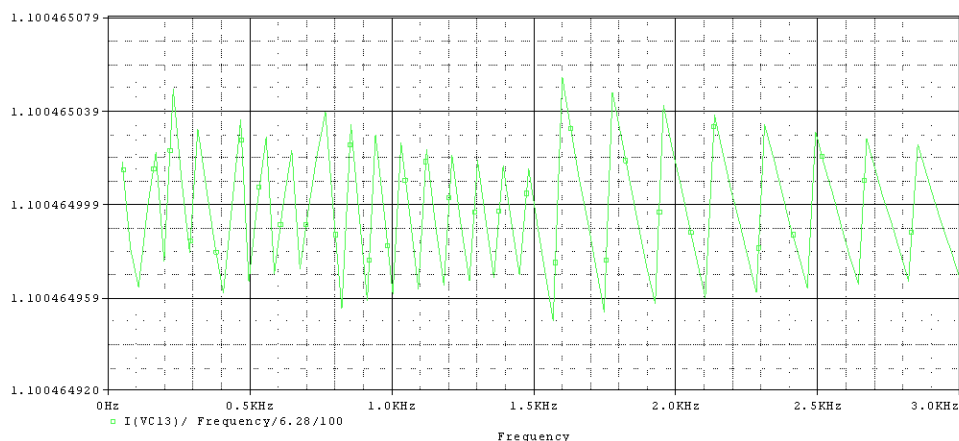
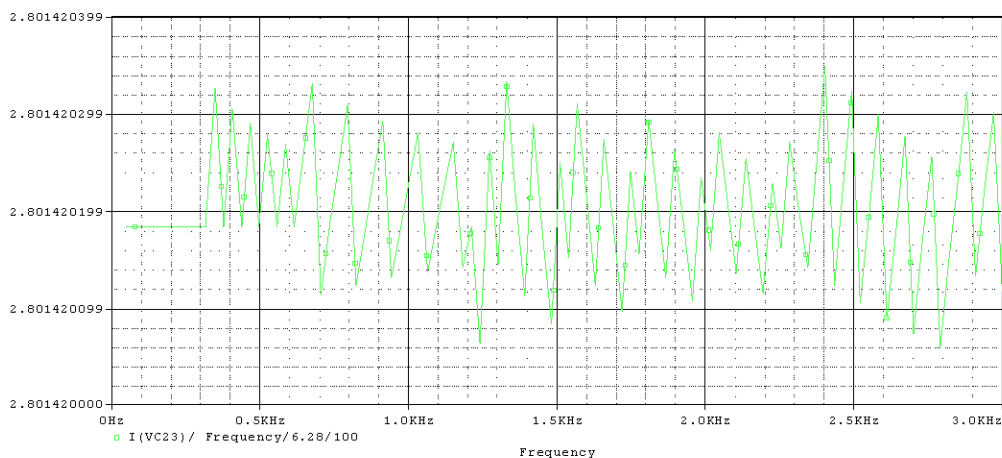
**KATEDRA ELEKTROTECHNIKY, ELEKTRONIKY
A ZABEZPEČOVACÍ TECHNIKY V DOPRAVĚ**

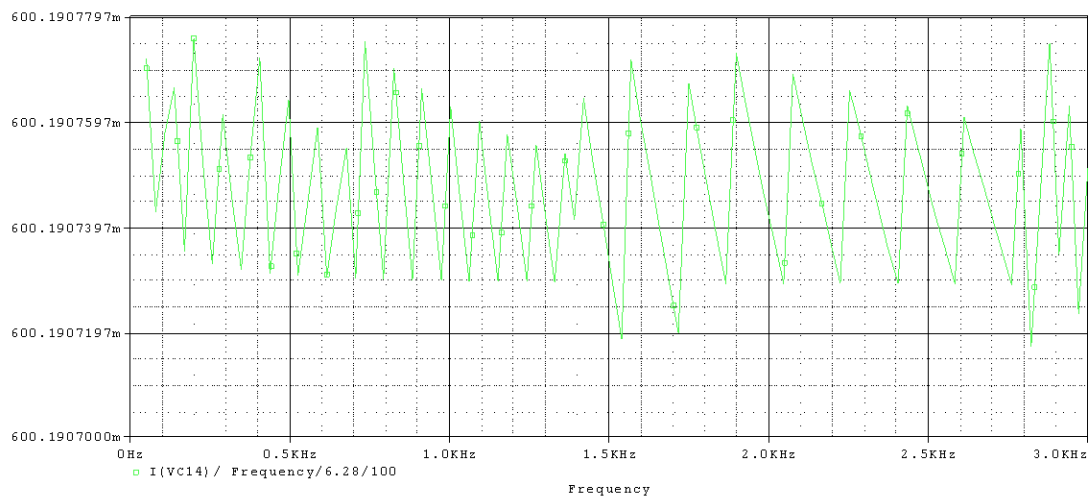
PŘÍLOHY K DISERTAČNÍ PRÁCI

**MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH VELIČIN PŘI
NESINUSOVÝCH PRŮBĚZÍCH NAPĚTÍ A PROUDU**

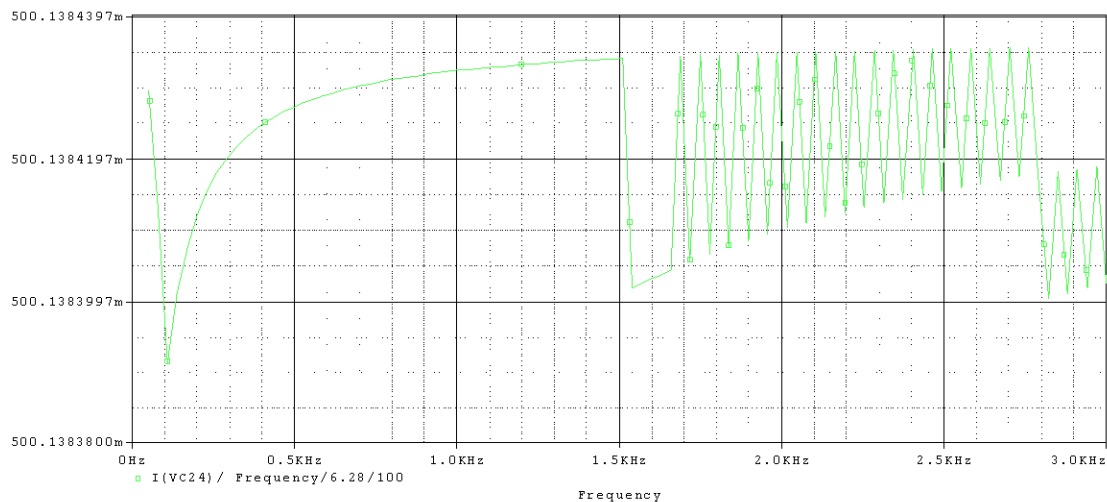
Příloha P-1 - Ověření správnosti určení hodnot kapacit spočítaných z tabulky 4.4 Gauss-Seidelovou metodou z hodnot kapacit měřených**Zdrojová data**

```
;Prověření odvození hodnoty  $C_{PS2}$  z měřené hodnoty  $C_{I3}$   
VC13 0 3 AC 100  
CPS1 0 2 0.5371  
CPS2 0 3 0.5371  
CS2B 3 4 0.1121  
CPB 0 4 0.4144  
CS1S2 2 3 2.4754  
CS1B 2 4 0.1121  
RPS1 0 2 1G  
RPS2 0 3 1G  
RS2B 3 4 1G  
RPB 0 4 1G  
RS1S2 2 3 1G  
RS1B 2 4 1G  
.AC LIN 100 50 3000  
.probe  
.end
```

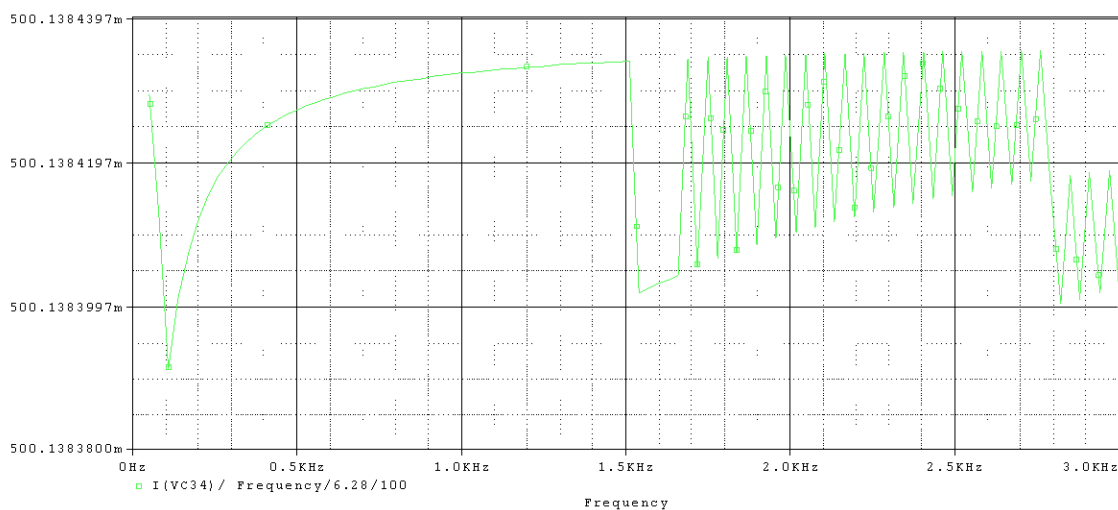
**Obrázek P-1.1 - Prověření odvození hodnoty C_{PS2} z měřené hodnoty C_{I3}** **Obrázek P-1.2 - Prověření odvození hodnoty C_{S1S2} z měřené hodnoty C_{23}**



Obrázek P-1.3 - Prověření odvození hodnoty C_{PB} z měřené hodnoty C_{14}

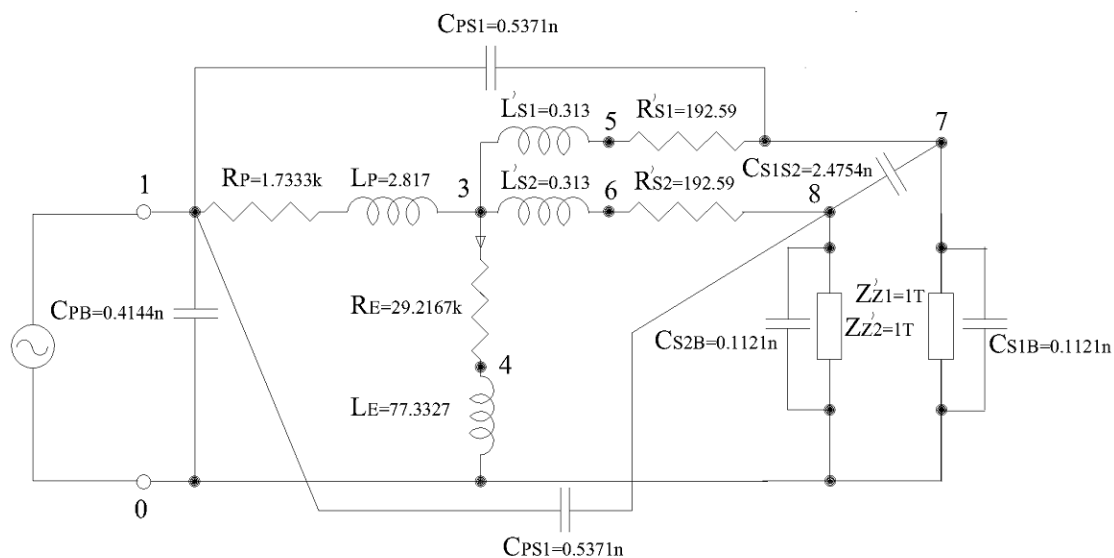


Obrázek P-1.4 - Prověření odvození hodnoty C_{S1B} z měřené hodnoty C_{24}

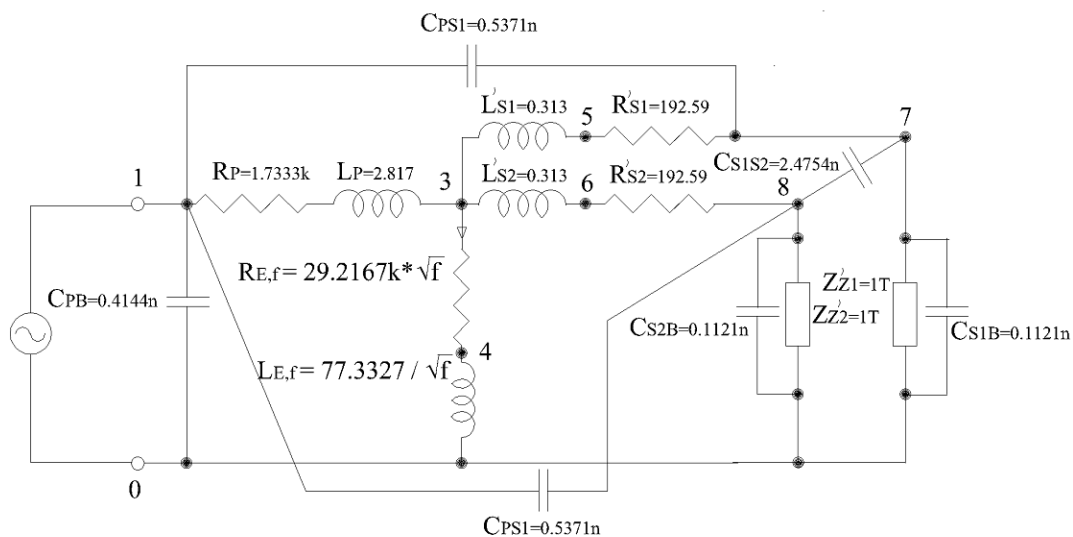


Obrázek P-1.5 - Prověření odvození hodnoty C_{S2B} z měřené hodnoty C_{34}

Příloha P-2 - Výzkum změny hodnot prvků náhradního schématu na změnu frekvenční závislosti chybu převodu a úhlu



Obrázek P-2.1 Model PTN bez uvažování frekvenční závislosti prvků R_E , L_E



Obrázek P-2.2 Model PTN s uvažováním frekvenční závislosti prvků $R_{E,f}$, $L_{E,f}$

Příklad zdrojových dat – model z obrázku P-2.1

Frekvenční závislost **převodu** PTN při proměnné frekvenci a proměnné hodnotě C_{PS1} (0,5371nF) v mezích -40% až +40%. Prvky L_E , R_E jsou v tomto případě frekvenčně nezávislé.

```
;CPS1
V1 1 0 AC 100
RP 1 2 1.7333k
LP 2 3 2.817
```

```
RE 3 4 29.2167k
LE 4 0 77.3327
RS1 3 5 192.59
LS1 5 7 0.313
RZ1 7 0 1T
RS2 3 6 192.59
LS2 6 8 0.313
RZ2 8 0 1T
CPB 1 0 0.4144n
CPS1 1 7 {CPS1var}
CPS2 1 8 0.5371n
CS1S2 7 8 2.4754n
CS1B 7 0 0.1121n
CS2B 8 0 0.1121n
.param CPS1var 0.5371n
.step param CPS1var list 0.3223n 0.5371n 0.7519n
.AC LIN 3000 1 3500
.probe V(1) V(8)
.end
```

$$\text{Vynesení průběhu: } \varepsilon_U = \left(\frac{V(8)}{V(1)} - 1 \right) \cdot 100 \text{ [%]}$$

Frekvenční závislost chyby **úhlu** PTN při proměnné frekvenci a proměnné hodnotě C_{PS1} (0,5371nF) v mezích -40% až +40%. Prvky L_E , R_E jsou v tomto případě frekvenčně nezávislé.

Stejný zdrojový program jako v případě chyby převodu.

$$\text{Vynesení průběhu: } \delta_U = VP(8) - VP(1) \text{ [°]}$$

Příklad zdrojových dat – model z obrázku P-2.2

Frekvenční závislost **převodu** PTN při proměnné frekvenci a proměnné hodnotě C_{PS1} (0,5371nF) v mezích -40% až +40%. Prvky $L_{E,f}$, $R_{E,f}$ jsou v tomto případě fr. závislé.

```
;CPS1a
V1 1 0 AC 100
RP 1 2 1.7333k
```

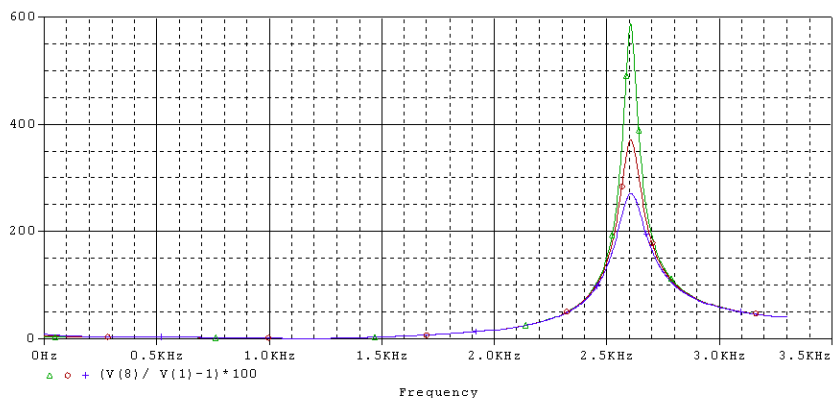
```
LP 2 3 2.817
RE 3 4 {REvar}
.param REvar=4131.87*f**0.5
LE 4 0 {LEvar}
.param LEvar=546.83/f**0.5
RS1 3 5 192.59
LS1 5 7 0.313
RZ1 7 0 1T
RS2 3 6 192.59
LS2 6 8 0.313
RZ2 8 0 1T
CPB 1 0 0.4144n
CPS1 1 7 {CPS1var}
.param CPS1var 0.5371n
.step param CPS1var list 0.3223n 0.5371n 0.7519n
CPS2 1 8 0.5371n
CS1S2 7 8 2.4754n
CS1B 7 0 0.1121n
CS2B 8 0 0.1121n
.AC LIN 3000 50 3500
.probe V(1) V(8)
.end
```

$$\text{Vynesení průběhu: } \varepsilon_U = \left(\frac{V(8)}{V(1)} - 1 \right) \cdot 100 \text{ [%]}$$

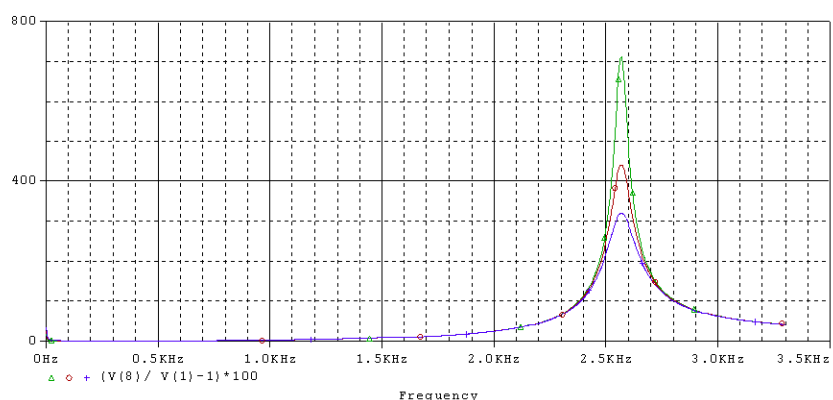
Frekvenční závislost chyby **úhlu** PTN při proměnné frekvenci a proměnné hodnotě C_{PS1} (0,5371nF) v mezích -40% až +40%. Prvky $L_{E,f}$, $R_{E,f}$ jsou v tomto případě frekvenčně závislé.

Stejný zdrojový program jako v případě chyby převodu.

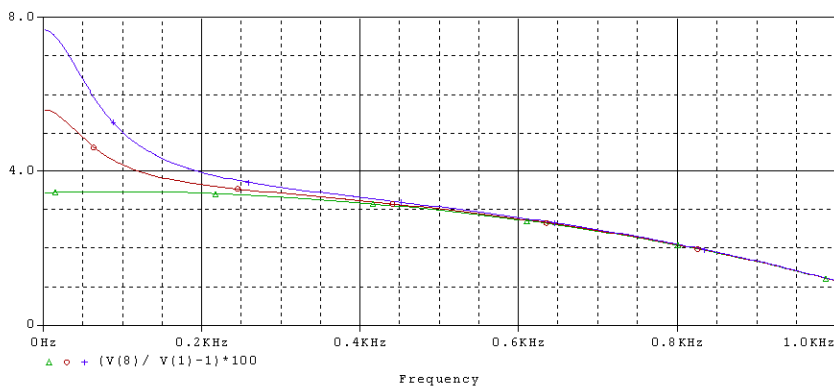
$$\text{Vynesení průběhu: } \delta_U = VP(8) - VP(1) \text{ [°]}$$



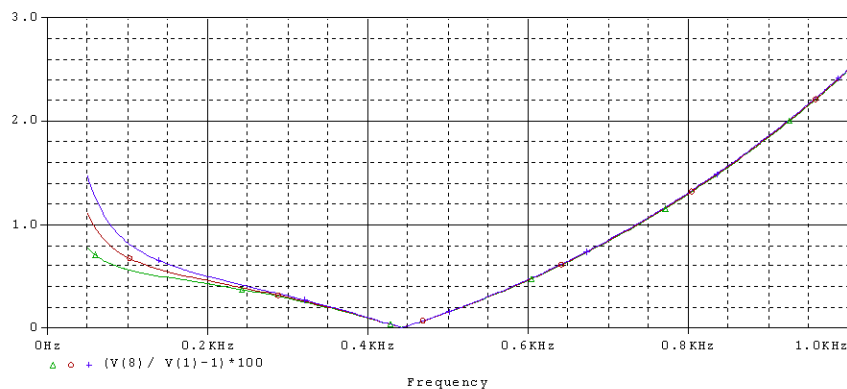
Obr. P-2.3 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna R_p , L_E a R_E frekvenčně nezávislé



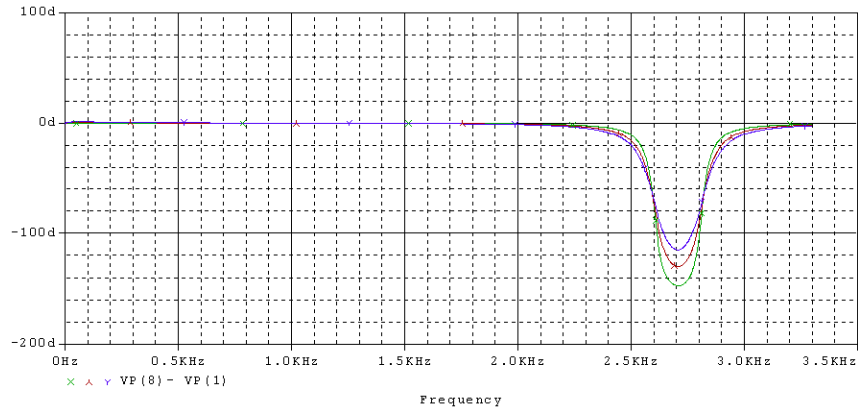
Obr. P-2.4 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna R_p , L_E a R_E frekv. závislé



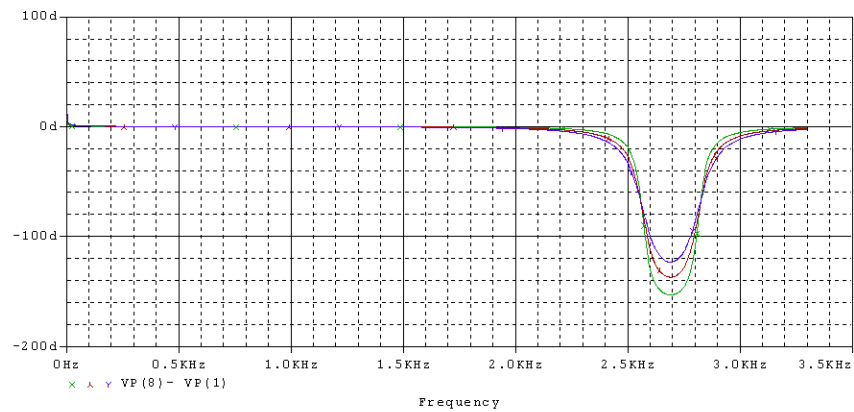
Obr. P-2.5 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna R_p , L_E a R_E frekv. nezávislé (detail)



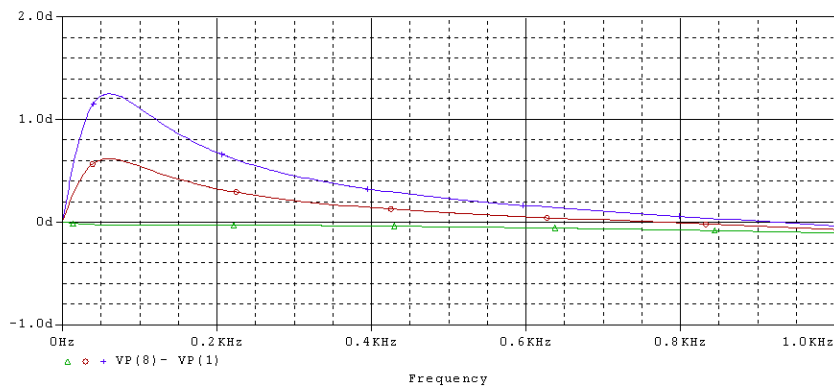
Obr. P-2.6 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna R_p , L_E a R_E frekv. závislé (detail)



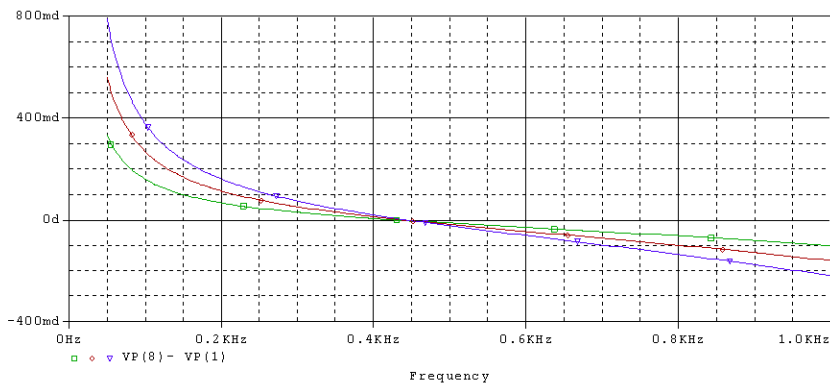
Obr. P-2.7 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna R_p , L_E a R_E frekvenčně nezávislé



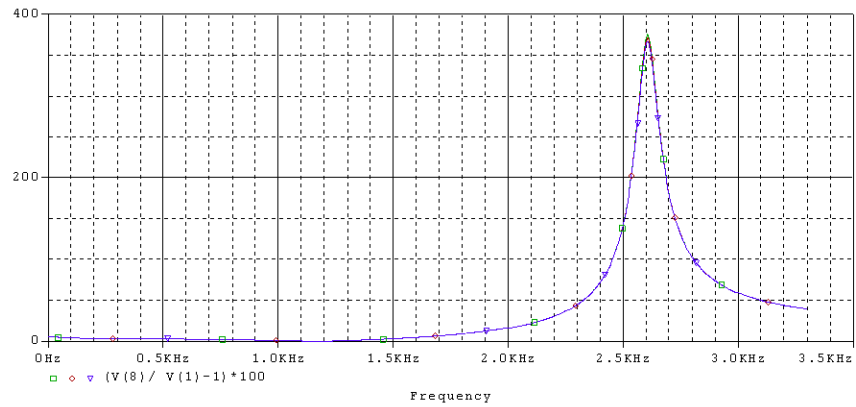
Obr. P-2.8 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna R_p , L_E a R_E frekv. závislé



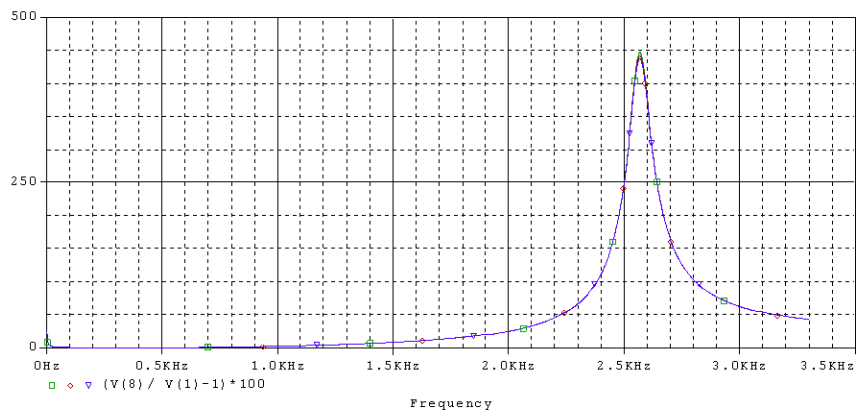
Obr. P-2.9 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna R_p , L_E a R_E frekv. nezávislé (detail)



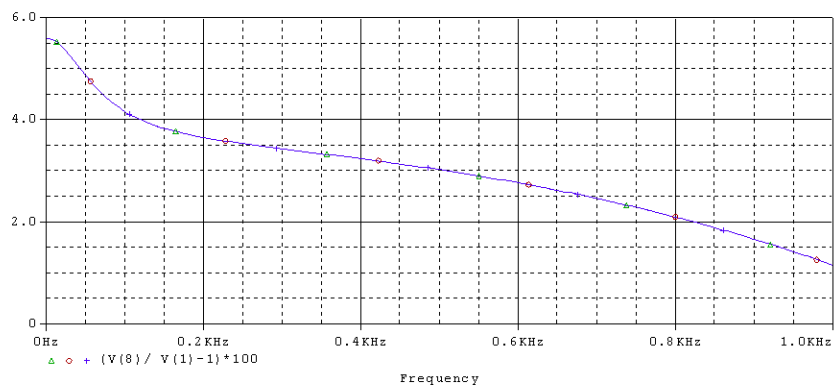
Obr. P-2.10 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna R_p , L_E a R_E frekv. závislé (detail)



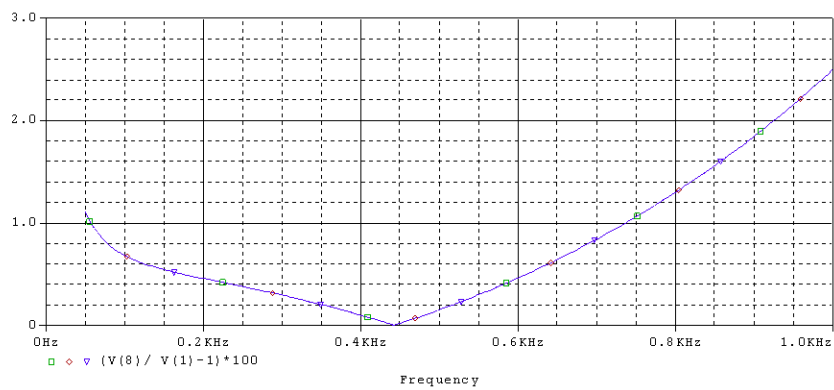
Obr. P-2.11 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna R_{S1} (R_{S2}), L_E a R_E fr. nezávislé



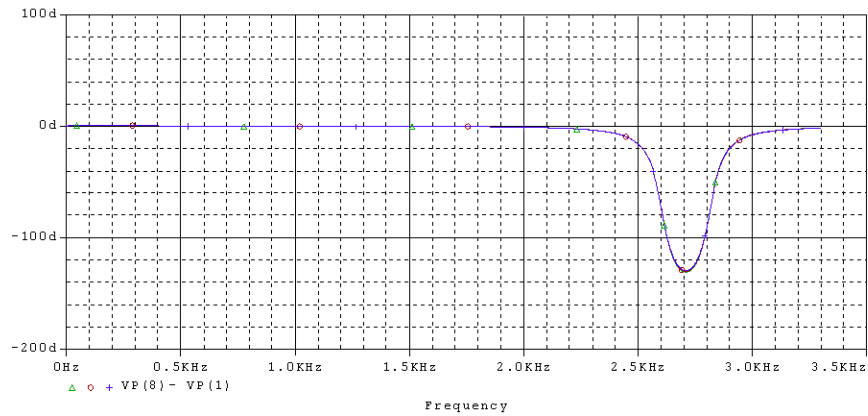
Obr. P-2.12 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna R_{S1} (R_{S2}), L_E a R_E fr. závislé



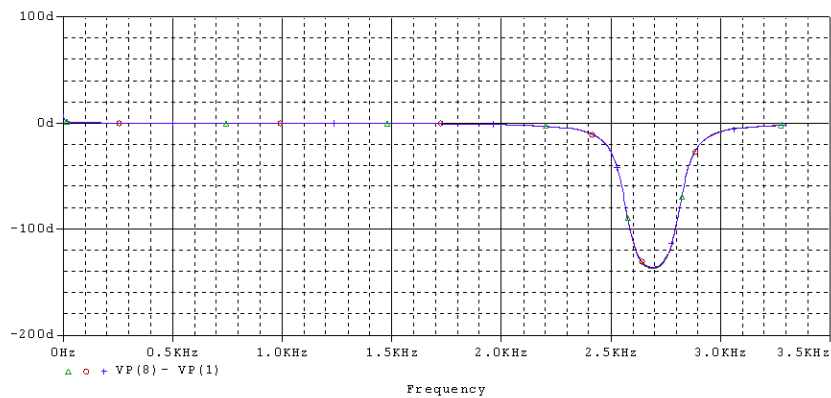
Obr. P-2.13 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna R_{S1} (R_{S2}), L_E a R_E fr. nez. (detail)



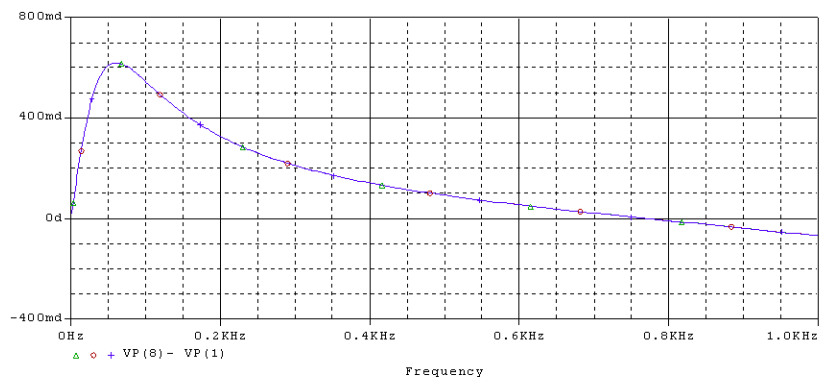
Obr. P-2.14 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna R_{S1} (R_{S2}), L_E a R_E fr. záv. (detail)



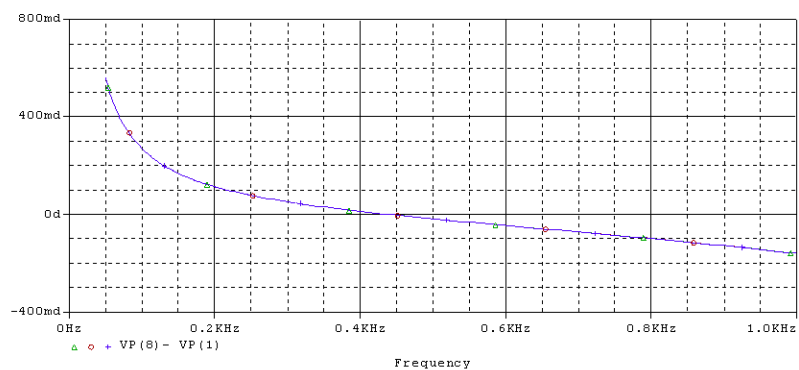
Obr. P-2.15 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna R_{S1} (R_{S2}), L_E a R_E fr. nezávislé



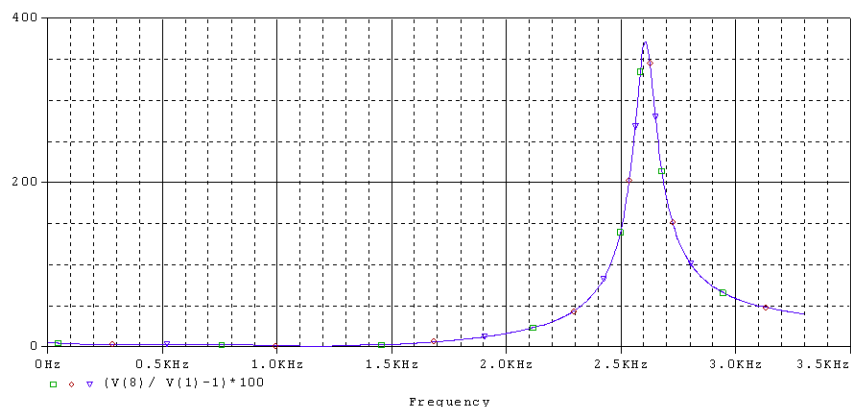
Obr. P-2.16 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna R_{S1} (R_{S2}), L_E a R_E fr. závislé



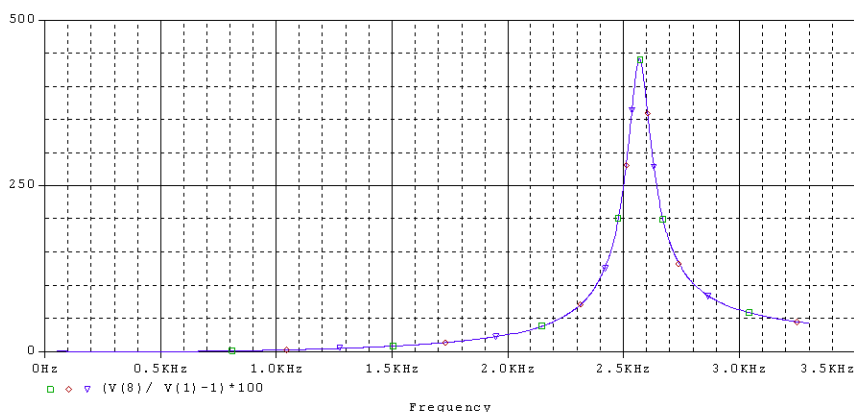
Obr. P-2.17 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna R_{S1} (R_{S2}), L_E a R_E fr. nez. (detail)



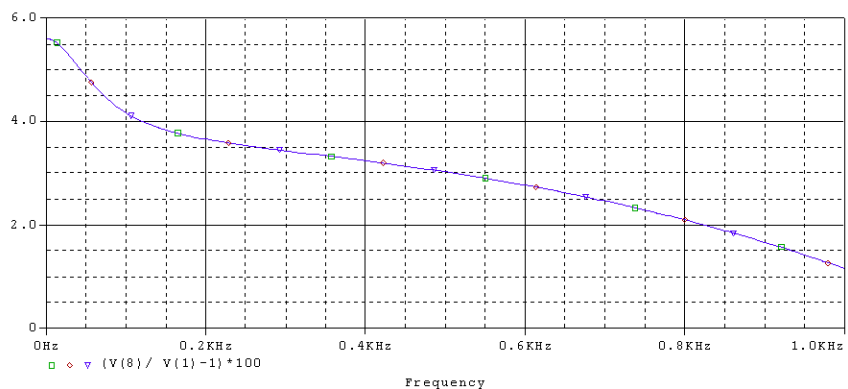
Obr. P-2.18 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna R_{S1} (R_{S2}), L_E a R_E fr. záv. (detail)



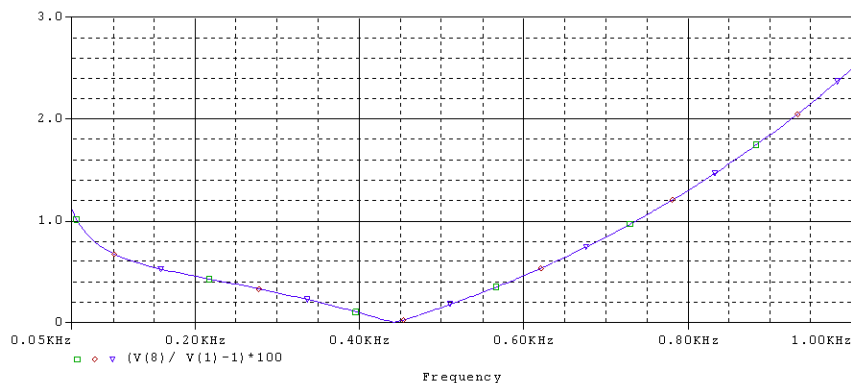
Obr. P-2.19 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna C_{PB} , L_E a R_E frekv. nezávislé



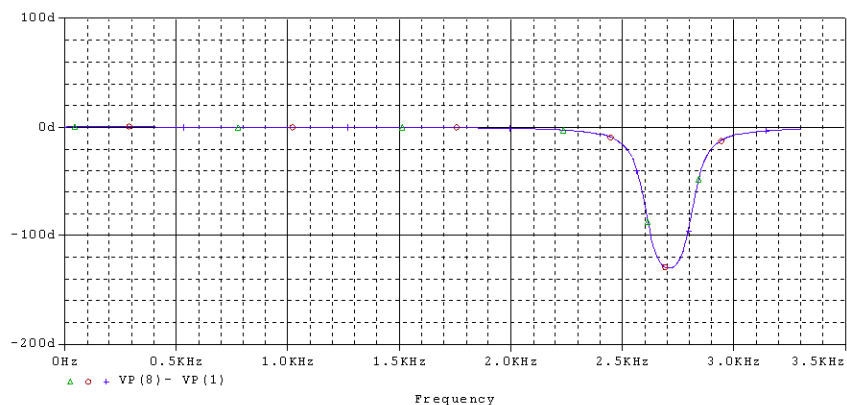
Obr. P-2.20 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna C_{PB} , L_E a R_E frekv. závislé



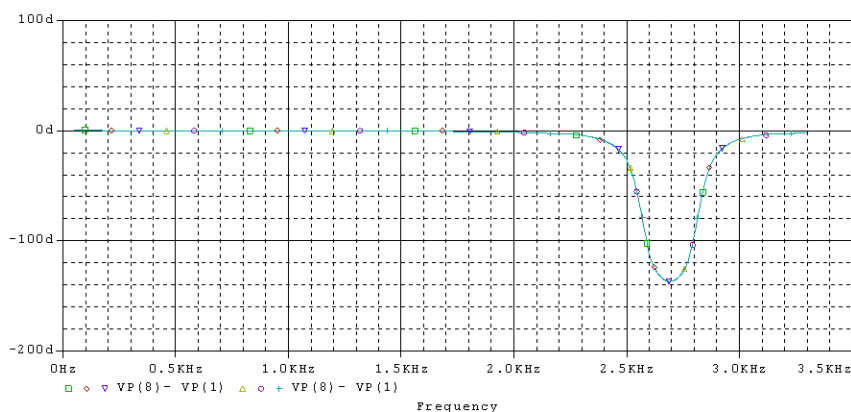
Obr. P-2.21 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna C_{PB} , L_E a R_E fr. nezávislé (detail)



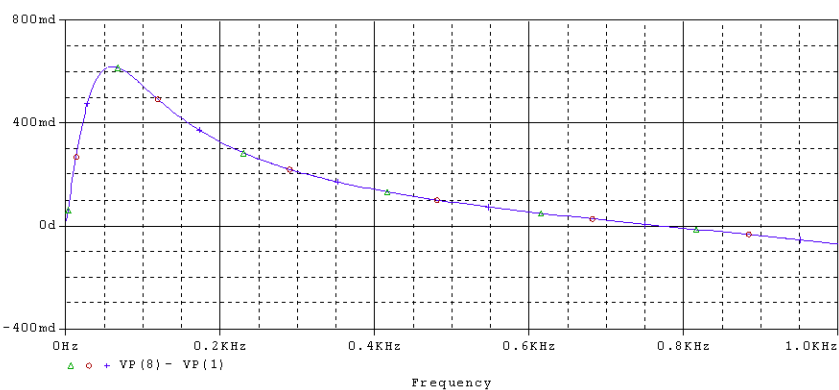
Obr. P-2.22 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna C_{PB} , L_E a R_E fr. závislé (detail)



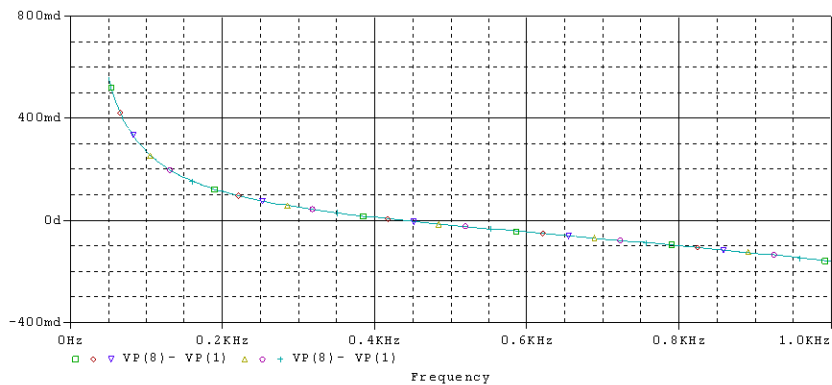
Obr. P-2.23 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna C_{PB} , L_E a R_E frekv. nezávislé



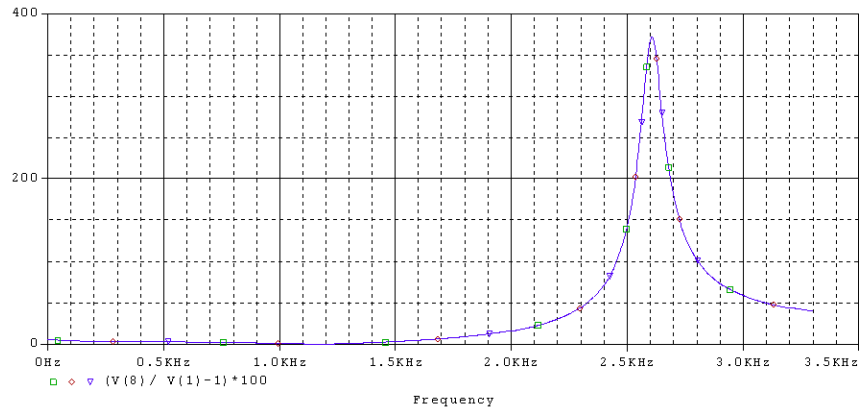
Obr. P-2.24 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna C_{PB} , L_E a R_E frekv. závislé



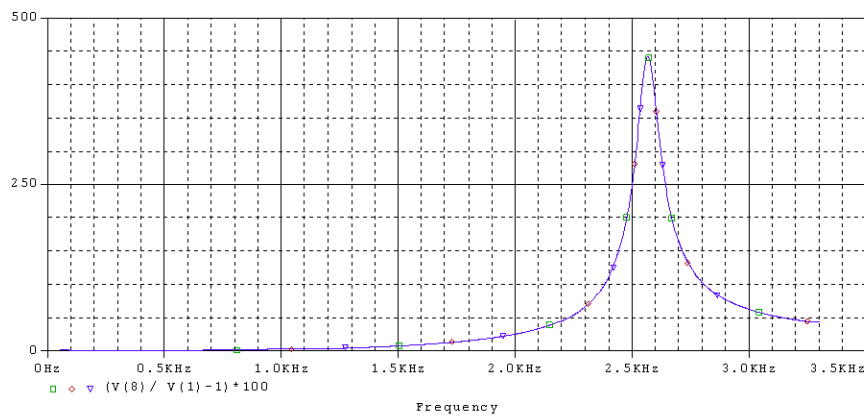
Obr. P-2.25 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna C_{PB} , L_E a R_E fr. nezávislé (detail)



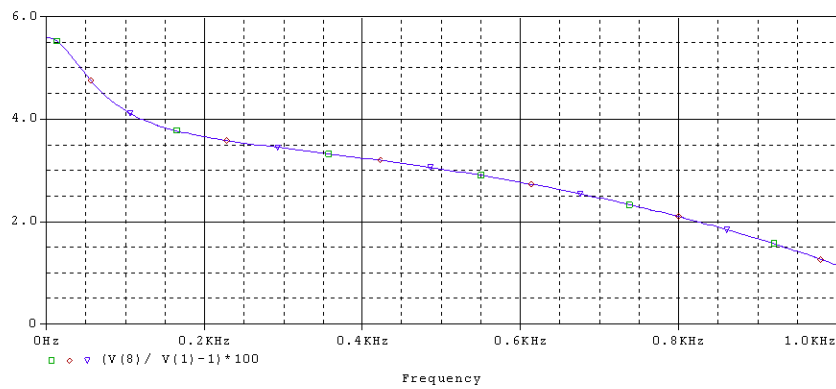
Obr. P-2.26 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna C_{PB} , L_E a R_E frekv. závislé (detail)



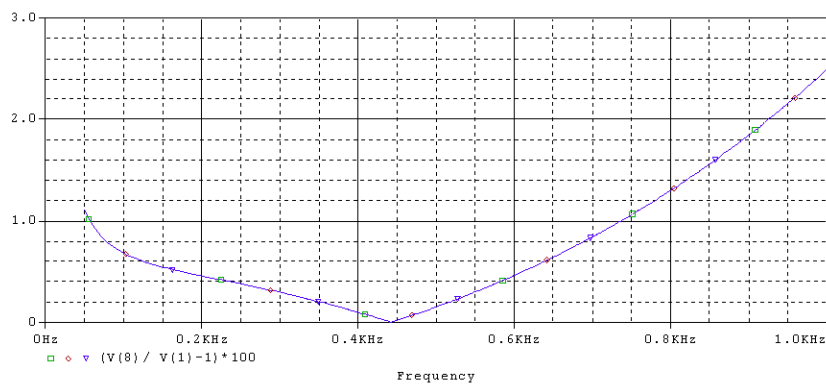
Obr. P-2.27 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna C_{S1S2} , L_E a R_E frekv. nezávislé



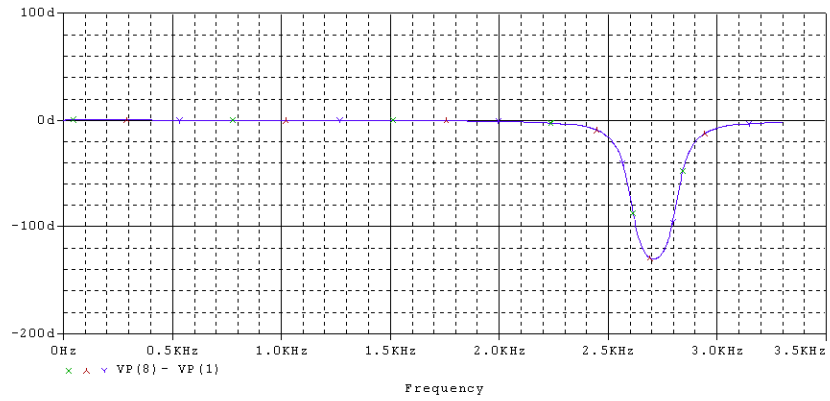
Obr. P-2.28 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna C_{S1S2} , L_E a R_E frekv. závislé



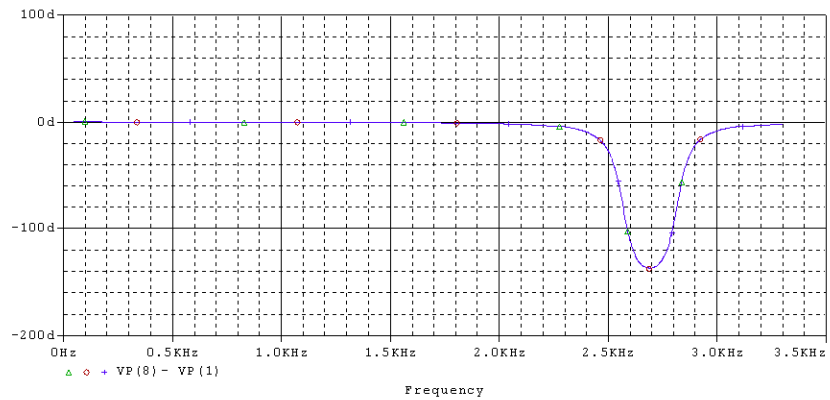
Obr. P-2.29 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna C_{S1S2} , L_E a R_E fr. nez. (detail)



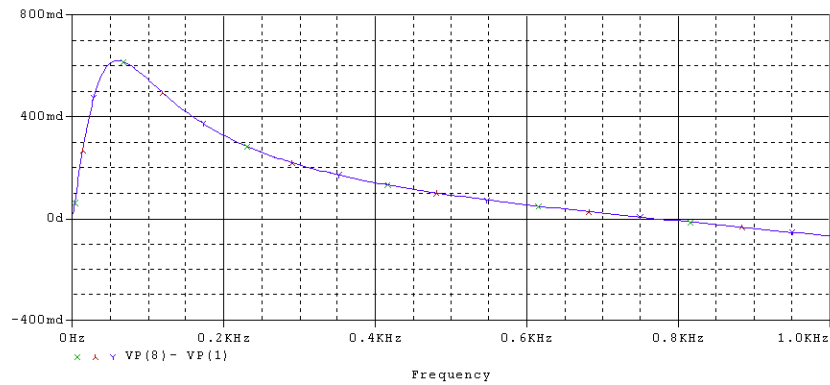
Obr. P-2.30 - Frekvenční závislost chyby převodu PTN, změna C_{S1S2} , L_E a R_E fr. nez. (detail)



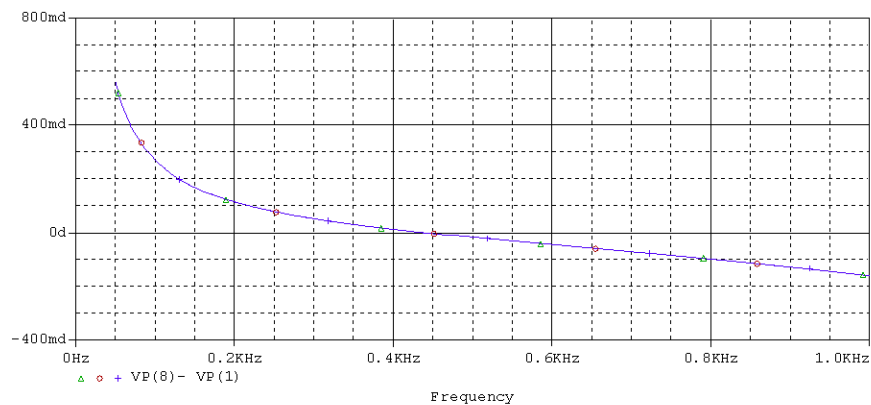
Obr. P-2.31 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna C_{S1S2} , L_E a R_E frekv. nezávislé



Obr. P-2.32 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna C_{S1S2} , L_E a R_E frekv. závislé



Obr. P-2.33 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna C_{S1S2} , L_E a R_E fr. nezávislé (detail)



Obr. P-2.34 - Frekvenční závislost chyby úhlu PTN, změna C_{S1S2} , L_E a R_E fr. nezávislé (detail)