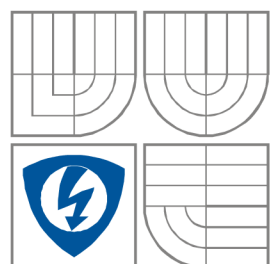


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLÓGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY  
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
ENGINEERING

## **MĚŘÍCÍ TRANSFORMÁTOR NAPĚTÍ**

**VOLTAGE TRANSFORMER**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

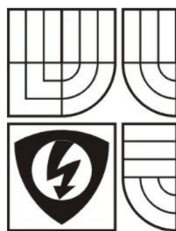
Martin Kovařík

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

BRNO, 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

**Student:** Martin Kovařík

**Ročník:** 3

**ID:** 136754

**Akademický rok:** 2013/14

**NÁZEV TÉMATU:**

## Měřicí transformátor napětí

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Teorie a výpočet napěťového přístrojového transformátoru vysokého napětí z portfolia ABB
2. Měření a výpočet hodnot náhradního schématu transformátoru
3. Teoretické výpočty hodnot
4. Porovnání vypočtených výsledků s naměřenými hodnotami

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

1. Cigánek, L., Bauer, M.: Elektrické stroje a přístroje
2. Fitzgerald, A.E., Kingsley, Ch., Kusko, A.: Electric machinery. McGraw Hill 1971
3. Podklady firmy ABB

**Termín zadání:** 27.9.2013

**Termín odevzdání:** 02.06.2014

**Vedoucí projektu:** doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## **Abstrakt**

Tato práce je zaměřena na zjištění parametrů prvků náhradního schématu přístrojového transformátoru napětí TJC 7-G z portfolia ABB. Největší důraz při řešení je kladen na správné určení rozptylových reaktancí primárního a sekundárního vinutí, které jsou dále používány pro správné nastavení ochran. Samotné měření je realizováno pomocí metod měření transformátoru naprázdno a nakrátko. Hodnoty jsou měřeny pro rozdílné frekvenční hladiny, aby bylo možno určit přesně všechny parametry. Teoretická část práce se zabývá využitím přístrojových transformátorů, teoretickou částí návrhu náhradního schématu a parametry, které ovlivňují třídy přesnosti. Závěr práce obsahuje vyhodnocení jednotlivých metod určení prvků náhradního schématu a jeho konečným sestavením.

## **Abstract**

This bachelor's thesis focuses on the elements of equivalent circuit parameters of voltage instrument transformer TJC 7-G from the portfolio of ABB. Main focus is placed on correct identification of the leakage reactance of primary and secondary winding, which are used for correct settlement of protections. The measurement is done by using methods of measurement of transformer without load and with short circuited secondary terminal. The values are measured for different frequency levels, in order to determine precisely all the parameters. The theoretical part describes the use of instrument transformers, theoretical creation of equivalent circuit and parameters which affects the accuracy class. The conclusion contains the evaluation of different methods for determining the elements of the equivalent circuit and with its final assembly.

## **Klíčová slova**

Rozptylová reaktance, přístrojový transformátor, měření naprázdno, měření nakrátko, mezizávitová kapacita, rezonance obvodu, pole dovolených chyb, jednofázové transformátory napětí

## **Keywords**

Leakage reactance, instrument transformer, no-load measurement, short-circuited measurement, winding capacity, circuit resonance, field of permissible errors, single-phase voltage transformer

## **Bibliografická citace**

KOVAŘÍK, M. Měřicí transformátor napětí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 49 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma měřicí přístrojový transformátor jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne .....

Podpis autora .....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Čestmíru Ondruškovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

Podpis autora .....



## OBSAH

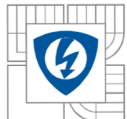
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	7
SEZNAM TABULEK .....	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
1 ÚVOD.....	10
2 ROZDĚLENÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ .....	11
2.1 ROZDĚLENÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU .....	12
2.2 ROZDĚLENÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ NAPĚTÍ.....	13
3 PŘÍSTROJOVÝ TRANSFORMÁTOR NAPĚTÍ.....	14
3.1 PŘÍSTROJOVÝ TRANSFORMÁTOR NAPĚTÍ TJC 7.0-G .....	14
3.2 DEFINICE ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ .....	15
4 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU NAPĚTÍ .....	19
5 CHYBY PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU NAPĚTÍ.....	23
5.1 ZOBRAZENÍ FÁZOROVÉHO DIAGRAMU CHYB.....	23
5.2 POLE DOVOLENÝCH CHYB.....	24
5.3 CHYBY PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU NAPĚTÍ V ZÁVISLOSTI NA VELIČINÁCH .....	25
5.3.1 CHYBA V ZÁVISLOSTI NA ZÁTĚŽI.....	25
5.3.2 CHYBA V ZÁVISLOSTI NA NAPĚTÍ .....	25
5.3.3 ZÁVISLOST CHYB NA SEKUNDÁRNÍM ÚČINÍKU COS $\phi$ .....	26
5.3.4 ZÁVISLOST CHYB NA FREKVENCI .....	26
5.4 VÝPOČET CHYB A JEJICH SLOŽEK .....	27
6 URČENÍ PRVKŮ NÁHRADNÍHO SCHÉMATU .....	29
6.1 TEORIE MĚŘENÍ NAPĚŤOVÉHO TRANSFORMÁTORU NAKRÁTKO.....	30
6.2 MĚŘENÍ TRANSFORMÁTORU NAPĚTÍ NAKRÁTKO .....	31
6.3 URČENÍ ROZPTYLOVÝCH REAKTANCÍ POMOCÍ ODPOROVÉHO ROZDĚLENÍ .....	32
6.4 URČENÍ ROZPTYLOVÝCH REAKTANCÍ EKVIVALENTNÍM ROZDĚLENÍM .....	33
6.5 URČENÍ ROZPTYLOVÝCH REAKTANCÍ POMOCÍ MEZIOBVODU DA-N .....	33
7 MĚŘENÍ PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU NAPRÁZDNO .....	37
7.1 MĚŘENÍ NAPRÁZDNO BEZ UVAŽOVÁNÍ KAPACITY PRO 40 HZ .....	37
7.2 URČENÍ KAPACITY POMOCÍ MĚŘENÍ NAPRÁZDNO .....	39
7.2.1 URČENÍ KAPACITY POMOCÍ REZONANCE .....	40
8 ZÁVĚR.....	42
LITERATURA .....	43
PŘÍLOHY .....	44



## SEZNAM OBRÁZKŮ

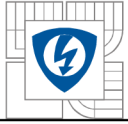
<i>Obrázek 1- Zapojení přístrojového transformátoru proudu (převzato z [2]) .....</i>	<i>11</i>
<i>Obrázek 2- Zapojení přístrojového transformátoru napětí (převzato z [2]).....</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 3- Transformátor napětí TJC 7.0-G.....</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 4-Rozměry transformátoru TJC 7.0-G.....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 5- Štítek přístrojového transformátoru napětí .....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 6-Náhradní schéma napětového transformátoru.....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 7- Fázorový diagram napětového transformátoru (převzato z [1]).....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 8- Fázorový diagram 1 (převzato z [1]) .....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 9- Fázorový diagram 2 (převzato z [1]) .....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 10 - Fázorový diagram transformátoru napětí (převzato z [1]).....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 11- Fázorový diagram transformátoru napětí (převzato z [1]).....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 12- Fázorový diagram vlivu mag. indukce na poloze koncového bodu (převzato z [1]).</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 13- Pole dovolených chyb (převzato z [1]).....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 14- Pole dovolených chyb (převzato z [1]).....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 15- Fázorový diagram chyb v závislosti na zátěži a napětí (převzato z [1]).....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 16 - Lineární závislost chyby na napětí (převzato z [1]).....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 17- Závislost chyb na sekundárním účinníku (převzato z [1]).....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 18- Fázorový diagram složek chyb (převzato z [1]).....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 19- Náhradní schéma transformátoru .....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 20- Schéma zapojení transformátoru ve stavu nakrátko .....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 21- Zjednodušené schéma zapojení transformátoru nakrátko.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 22- Náhradní schéma s meziobvodem da-n .....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 23- Fázorový diagram rozptylových reaktancí.....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 24- Fázorový diagram pro 50 Hz .....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 25- Fázorový diagram pro 120 Hz .....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 26- Fázorový diagram pro 5000 Hz .....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 27- Náhradní schéma transformátoru TJC 7.0-G .....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 28- Graf závislosti frekvence na napětí .....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 29- Graf závislosti napětí na frekvenci .....</i>	<i>48</i>





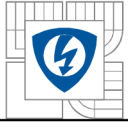
## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 - Dovolené meze chyb pro měřicí třídy (převzato z [1]) .....</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 2 - Dovolené meze chyb pro jistící třídy (převzato z [1]).....</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 3 - Tabulka naměřených hodnot pro 50Hz.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 4- Naměřené hodnoty .....</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 5 - Naměřené hodnoty pro rozdílné frekvence .....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 6 - Naměřené hodnoty pro zapojení naprázdno .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 7- Naměřené hodnoty pro zapojení nakrátko.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 8 - Naměřené hodnoty převodu transformátoru.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 9 - Použité měřicí přístroje.....</i>	<i>48</i>



## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$U_{1n}$	- Jmenovité primární napětí transformátoru (V)
$U_{2n}$	- Jmenovité sekundární napětí transformátoru (V)
$U_n$	- Jmenovité napětí soustavy (V)
$U_m$	- Nejvyšší jmenovité napětí soustavy (V)
$U_{nm}$	- Zvýšené napětí soustavy (V)
$K_{nm}$	- Činitel zvýšení napětí (-)
$Y$	- Admitance transformátoru (S)
$G$	- Konduktance (S)
$B$	- Susceptance (S)
$Y_n$	- Maximální hodnota admitance, při které
$P$	- Zátěž transformátoru (VA)
$P_n$	- Jmenovitá zátěž transformátoru (VA)
$P_{ku}$	- Krajní zátěž transformátoru (VA)
$\cos\beta$	- Sekundární účinník transformátoru (-)
$\varepsilon$	- Chyba napětí transformátoru (%)
$\delta_u$	- Chyba úhlu transformátoru (min)
$T_p$	- Třída přesnosti transformátoru (-)
$\Delta U$	- Fázor úbytku napětí (V)
$I_1$	- Proud primární strany (A)
$I_2$	- Proud sekundární strany (A)
$U'_2$	- Přepočítaná hodnota sekundárního napětí pomocí převodu transformátoru (V)
$I'_2$	- Přepočítaná hodnota sekundárního proudu pomocí převodu transformátoru (A)
$U'_{20}$	- Přepočítaná hodnota napětí příčné větve transformátoru pomocí převodu transformátoru (V)
$X_{L1\sigma}$	- Rozptylová reaktance primárního vinutí ( $\Omega$ )
$X'_{L2\sigma}$	- Přepočtená rozptylová reaktance sekundárního vinutí ( $\Omega$ )
$R_1$	- Odpor primárního vinutí ( $\Omega$ )
$R_2$	- Odpor sekundárního vinutí ( $\Omega$ )
$R'_2$	- Odpor sekundárního vinutí přepočtený na stranu vyššího napětí ( $\Omega$ )
$R_{Fe}$	Odpor železa ( $\Omega$ )
$L_\mu$	Indukčnost cívky příčné větve (H)
$C$	Mezizávitová kapacita (F)



# 1 ÚVOD

Pro spolehlivý chod výroby, rozvodu a spotřeby elektrické energie je přístrojový transformátor nepostradatelnou součástí. Pořizovací cena ani náklady spojené s provozem přístrojových transformátorů nejsou nikterak vysoké. Bez přístrojových transformátorů by však téměř nebylo možné měřit vyrobenou a dodávanou elektrickou energii. Přístrojový transformátor je využíván k monitorování elektrizačních soustav, které díky tomu mohou fungovat bezpečně a hospodárně.

K monitorování jednotlivých elektrických veličin nám slouží rozdílné přístroje. Hlavní úlohou přístrojových transformátorů je tedy transformovat měřené napětí nebo proud na hodnotu odpovídající vstupním požadavkům měřicího přístroje. Při transformaci určené k měřicím účelům tedy musí docházet k co nejmenším chybám, zatímco u transformací užitých k jisticím účelům je nutné také dodržet určitou funkčnost měření při rozdílných stavech v elektrické síti, například při zkratu.

Souhrnně lze tyto přístroje rozdělit do dvou skupin, na přístroje měřicí a přístroje jisticí. Jako jednu z jejich velmi důležitých vlastností považujeme schopnost galvanicky oddělit okruh vysokého napětí od okruhu nízkého napětí, a tím zajistit bezpečnost provozu zařízení v okruhu nízkého napětí. Pro přístrojový transformátor jsou aplikovány stejné fyzikální zákony jako pro běžné transformátory, rozdílnost je pouze v okruhu použití.

## 2 ROZDĚLENÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

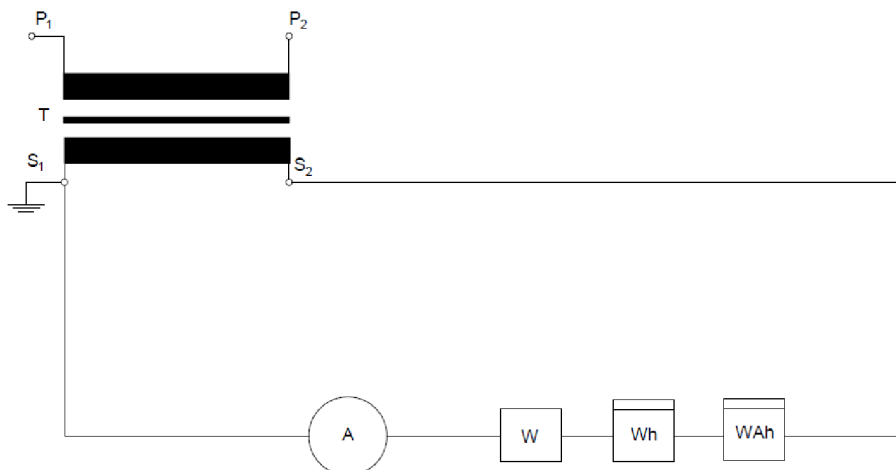
Nejběžnější rozdělení přístrojových transformátorů se odvíjí od jejich vlastní fyzické konstrukce, umístění a funkce.

1. Transformovaná veličina
  - Transformátor proudu
  - Transformátor napětí
  - Transformátor kombinovaný
2. Umístění přístrojového transformátoru
  - Transformátor pro vnitřní použití
  - Transformátor pro venkovní použití
3. Funkce přístrojového transformátoru
  - Transformátor měřicí
  - Transformátor jistící
  - Transformátor s kombinovanou funkcí ochrany i měření

Další dělení přístrojových transformátorů se již odvíjí zejména podle transformované veličiny. Práce se bude zabývat výhradně určením prvků náhradního schématu a vytvořením náhradního schématu přístrojového transformátoru napětí, pro úplnost zde budou uvedeny i informace o přístrojových transformátorech proudu. Základní informace o přístrojových transformátorech proudu jsou nezbytné k rozlišení konstrukčního a funkčního rozdílu proudového a napěťového transformátoru.

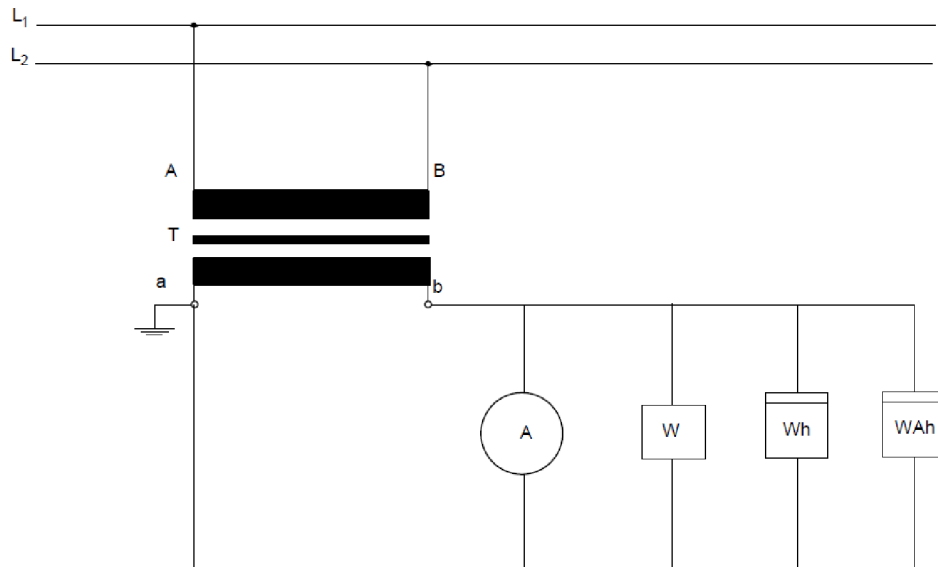
Prvním rozdílem v užití přístrojového transformátoru proudu je jeho vlastní zapojení do elektrického obvodu. Přístrojový transformátor proudu je zapojen v obvodu vždy sériově, zatím co přístrojový transformátor napětí je připojen výhradně paralelně, mezi fází a zem v případě jedno pólově izolovaného napěťového transformátoru a mezi fázemi v případě dvoupólově izolovaného transformátoru.

Ukázka zapojení transformátoru proudu je uvedena na obr. 1.



Obrázek 1 - Zapojení přístrojového transformátoru proudu (převzato z [2])

Zapojení napěťového transformátoru je uvedeno na obr. 2.

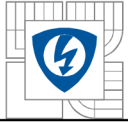


Obrázek 2 - Zapojení přístrojového transformátoru napětí (převzato z [2])

## 2.1 Rozdělení přístrojových transformátorů proudu

Přístrojové transformátory proudu lze rozdělit do několika skupin – podle jejich tvaru a umístění primárních vývodů, dle konstrukce primárního vinutí a podle jiných hledisek. Základní rozdělení je uvedeno níže.

1. Podle tvaru a umístění primárních vývodů
  - Transformátory podpěrné
  - Transformátory průchodkové
  - Transformátory průchozí
2. Podle primárního vinutí
  - Jednozávitové
  - Závitové
  - Smyčkové
  - Tyčové
  - Prstencové
  - Kombinované primární vinutí
3. Podle jiných hledisek
  - Jednojádrové
  - Vícejádrové
  - S rozebíratelným magnetickým obvodem
  - S několika sekundárními výstupy
  - Kaskádové
  - Sčítací



Nejčastěji používané přístrojové transformátory proudu jsou transformátory podpěrné s více jádry, kde jedno jádro je určeno k měřicím účelům a druhé jádro je dimenzováno jako jistící. V některých případech je přidáváno ještě třetí jádro, které je určeno k tarifnímu měření. Přístrojové transformátory vysokého napětí jsou do rozváděčů dodávány většinou v množství tří přístrojových transformátorů na jeden panel. Na každou fázi, tedy připadá jeden přístrojový transformátor proudu.

## 2.2 Rozdělení přístrojových transformátorů napětí

Přístrojové transformátory napětí dělíme podle mechanické konstrukce, způsobu transformace a podle typu jejich zapojení.

1. Podle způsobu transformace
  - Transformátor indukční
  - Transformátor kapacitní
2. Podle počtu fází
  - Jednofázové
  - Třífázové
3. Podle izolace primárního vinutí
  - Jednofázové – jednopólově izolované
  - Jednofázové – dvoupólově izolované
  - Třífázové – uzemněné
  - Třífázové – plně izolované

[1]

Dle výše uvedeného dělení lze popsat přístrojový transformátor napětí přidělený společností ABB s.r.o. k analýze jednotlivých prvků obvodu jako transformátor jednofázový s izolací jednoho pólu. Jeho vlastní konstrukce je potom tvořena na principu indukce. Z typové řady ABB se jedná o produkt TJC 7.0-G, který je určen k měření napětí do 35 kV.

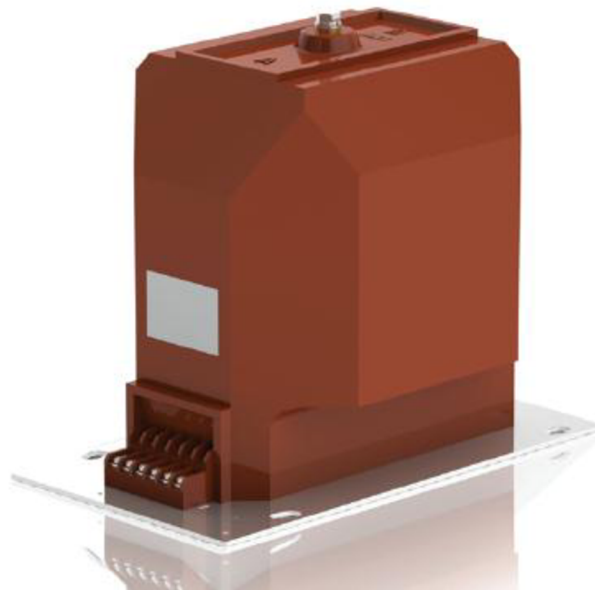
### 3 PŘÍSTROJOVÝ TRANSFORMÁTOR NAPĚTÍ

Požadavky na konstrukci napěťového transformátoru jsou vždy dány typem aplikace, kde bude transformátor využit. Konstrukce přístrojového transformátoru napětí je tedy ovlivněna hned několika parametry, které je nutno předem definovat. Objasněním důležitých parametrů pro konstrukci transformátoru napětí a jejich vliv na funkční celek je popsán v následující části práce.

#### 3.1 Přístrojový transformátor napětí TJC 7.0-G

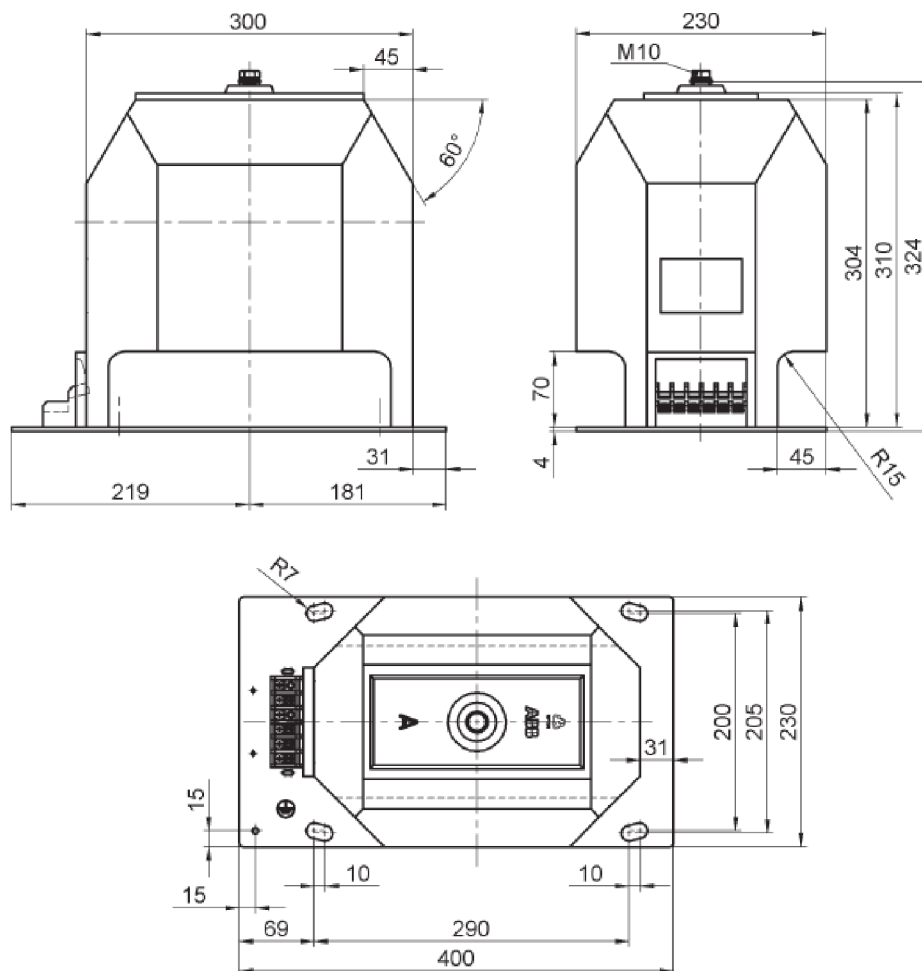
Jednopolově izolované transformátory napětí TJC 7.0-G z portfolia ABB jsou navrženy pro izolační napětí do 36 kV. Jako konstrukční materiál je zde použita epoxidová pryskyřice a jedná se o transformátory určené k vnitřnímu použití. Pokud není vyžadována jiná hodnota, jsou transformátory vyráběny s činitelem přepětí  $1,9 * U_n/8$ hod. Jeden vývod primárního vinutí, včetně příslušné koncové svorky je izolován od země na úroveň, která odpovídá jmenovité izolační hladině. Druhý vývod primárního vinutí s koncovou svorkou je za provozu uzemněn.

Maximální počet sekundárních vinutí pro typ TJC 7.0-G jsou 3 sekundární vinutí, kde první dvě vinutí se využívají k měřicím účelům a třetí vinutí se zapojuje do otevřeného trojúhelníku v trojfázové soustavě. Za provozu musí být vždy jedna ze svorek sekundárního vinutí spojena se zemí.



*Obrázek 3 - Transformátor napětí TJC 7.0-G*

Průměrná váha jednoho transformátoru TJC 7.0-G se pohybuje okolo 48 kg. Tato hodnota se může měnit v závislosti na požadovaných parametrech. Pro představu je níže uvedena rozměrová výkresová dokumentace obsahující základní rozměry transformátoru. Všechny hodnoty jsou uváděny v milimetrech.



Obrázek 4 - Rozměry transformátoru TJC 7.0-G

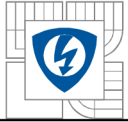
### 3.2 Definice základních parametrů

Základním parametrem napěťového transformátoru je napěťová hladina, pro kterou je daný transformátor dimenzován. Každý transformátor je opatřen štítkem, kde je uvedeno jeho jmenovité primární napětí  $U_{1n}$ . Dalším základním parametrem je transformované napětí na výstupu sekundární strany – jmenovité sekundární napětí. Jmenovité sekundární napětí je zvoleno dle připojeného měřicího přístroje, ve většině případů se jedná o 100 V, 110 V a 120 V. U třífázových uzemněných jednopólově izolovaných transformátorů se pak jedná o hodnoty  $100\sqrt{3}$  V,  $110\sqrt{3}$  V a  $120\sqrt{3}$  V.

Provozní charakteristika soustavy se stanovuje ze jmenovitého napětí soustavy  $U_n$ , které ve většině případů odpovídá jmenovitému primárnímu napětí transformátoru. Izolační vinutí transformátoru  $U_1$  většinou odpovídá nejvyššímu možnému napětí, které se za provozu může objevit v soustavě. Nejvyšší dovolené napětí  $U_m$ , které se za normálních podmínek může kdykoli a na jakémkoli místě objevit v rámci dané soustavy.

Za předepsaných atmosférických podmínek se transformátor zkouší zkušebními napětími  $U_f$  s kmitočtem 200 Hz po dobu 1 minuty. Zvýšené napětí  $U_{nm}$  je napětí, které přístrojový transformátor napětí musí vydržet po stanovenou dobu. V současné době je hodnota této veličiny





dle aktuálních standardů vycházejících z normy IEC 60044-2 stanovena na 1,9 násobek jmenovité hodnoty primárního napětí  $U_n$  po dobu 8 hodin pro jednopólově izolované transformátory. Pro dvoupólově izolované transformátory je hodnota zvýšeného napětí  $U_{nm}$  stanovena na 1,2 násobek jmenovité hodnoty primárního napětí  $U_n$  v nepřetržitém provozu, není tedy časově omezena. Při zvýšeném napětí musí být zachovány třídy přesnosti definované pro daný transformátor a hodnoty oteplení nesmí překročit stanovené limity.

Ukázka štítku z přístrojového transformátoru TJC z portfolia ABB, který obsahuje nepostradatelné hodnoty pro návrh a realizaci konstrukce přístrojového transformátoru napětí je zobrazena na obr. 5.



Obrázek 5 - Štítek přístrojového transformátoru napětí

Činitel zvýšení napětí  $K_{nm}$ , který vychází z podílu zvýšeného napětí a hodnoty jmenovitého napětí. [1]

$$K_{nm} * U_{1n} = U_{nm} \quad [V] \quad 3.1$$

$K_{nm}$  - Činitel zvýšení napětí (-)

$U_{1n}$  - Jmenovitá hodnota napětí (V)

$U_{nm}$  - Zvýšená hodnota napětí (V)

Admitance transformátoru je veličina úměrná celkové admitanci připojených přístrojů a přívodů, které jsou připojeny na sekundární svorky. [1]

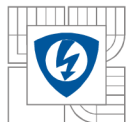
$$|Y| = \sqrt{G^2 + B^2} \quad [S] \quad 3.2$$

$|Y|$  - Modul admitance příčné větve transformátoru (S)

$G$  - Konduktance příčné větve transformátoru (S)

$B$  - Susceptance příčné větve transformátoru (S)

Jmenovitá zátěž transformátoru napětí  $Y_n$  je rovna maximální admitanci, kterou lze zatížit sekundární stranu transformátoru bez toho, aby se překročila maximální dovolená tolerance chyby.



Zátěž transformátoru napětí  $P$  je součin břemene a čtverce jmenovitého sekundárního napětí. [1]

$$P = |Y| * U_n^2 \quad [VA] \quad 3.3$$

$P$  - Zátěž transformátoru (VA)

$|Y|$  - Modul admitance příčné větve transformátoru (S)

$U_n$  - Jmenovité napětí soustavy (V)

Jmenovitá zátěž transformátoru napětí  $P_n$  je zátěž uvedená na štítku a rovná se součinu jmenovitého břemene a čtverce jmenovitého sekundárního napětí. Krajiní zátěž transformátoru  $P_{ku}$  je zátěž, kterou lze trvale zatížit sekundární vinutí při trvale zvýšeném napětí, přičemž chyba napětí nesmí překročit 10 % a oteplení nesmí přesáhnout předepsanou mez.

Sekundární účinník transformátoru napětí  $\cos\beta$ , který popisuje poměr vodivosti a admitance břemene. [1]

$$\cos\beta = \frac{G}{Y} \quad [-] \quad 3.4$$

$\cos\beta$  - Sekundární účinník (-)

$G$  - Konduktance příčné větve transformátoru (S)

$Y$  - Modul admitance příčné větve transformátoru (S)

Měřicí rozsah přístrojového transformátoru napětí je rozsah hodnot, které se mohou objevit na primárních svorkách, pro které platí, že jsou stanoveny dovolené hodnoty oteplení a chyb. Jistící rozsah napěťového transformátoru je potom rozsah napětí, pro který jsou stanoveny hodnoty chyb pro jištění.

Protože převod transformátoru není přímo úměrný převodu jmenovitému, vzniká chyba napětí  $\varepsilon$ . Chyba napětí má kladný charakter v případě, že součin naměřené sekundární hodnoty napětí a převodu je větší než skutečná hodnota primárního napětí. [1]

$$\varepsilon = \frac{U_2 * K_u - U_1}{U_1} \quad [\%] \quad 3.5$$

$\varepsilon$  - Chyba napětí transformátoru (%)

$U_2$  - Napětí na sekundární straně transformátoru (V)

$K_u$  - Koeficient převodu transformátoru (-)

$U_1$  - Napětí na primární straně transformátoru (V)

Chyba úhlu transformátoru napětí  $\delta_u$  je rozdíl fáze mezi fázorem primárního napětí a fázorem sekundárního napětí. Fázorový směr je následně volen tak, aby byl co nejmenší. Tato skutečnost vychází z toho, že ideální transformátor má nulový posun, tedy i nulový úhel.

Velmi důležitým parametrem přístrojového transformátoru napětí je třída přesnosti  $T_p$ . Třída přesnosti určuje, jaké maximální chyby se může při daných podmínkách v provozu přístrojový transformátor dopouštět. Používané třídy přesnosti u přístrojového transformátoru napětí pro měřicí účely jsou následující 0,1, 0,2, 0,5, 1, 3 a pro jistící účely 3P a 6P.



Chyba úhlu a chyba napětí u přístrojového transformátoru napětí pro třídy přesnosti 0,1 až 3, pokud jsou na sekundární straně zatíženy břemeny v rozsahu 25 – 100 % z hodnoty jmenovité zátěže, přičemž jmenovitý sekundární účinník  $\cos\beta = 0,8$  a napětí je v rozsahu 80 – 120 % jmenovité napětí se jmenovitým kmitočtem nesmějí přesáhnout hodnoty uvedené v tab. 1. Pokud hodnota jmenovité zátěže při 25 % větší jak 15 VA, musí být chyby v dovolených mezích podle tabulky již od zátěže 15 VA.

Tabulka 1 – Dovolené meze chyb pro měřicí třídy (převzato z [1])

Třída přesnosti - $T_p$	Chyba napětí +- $\epsilon_u$	Chyba úhlu +- $\delta_u$
	Měřicí rozsah 80 % až 100 % $U_{1n}$	
	%	minut
0,1	0,1	5
0,2	0,2	10
0,5	0,5	20
1	1	40
3	3	není omezena

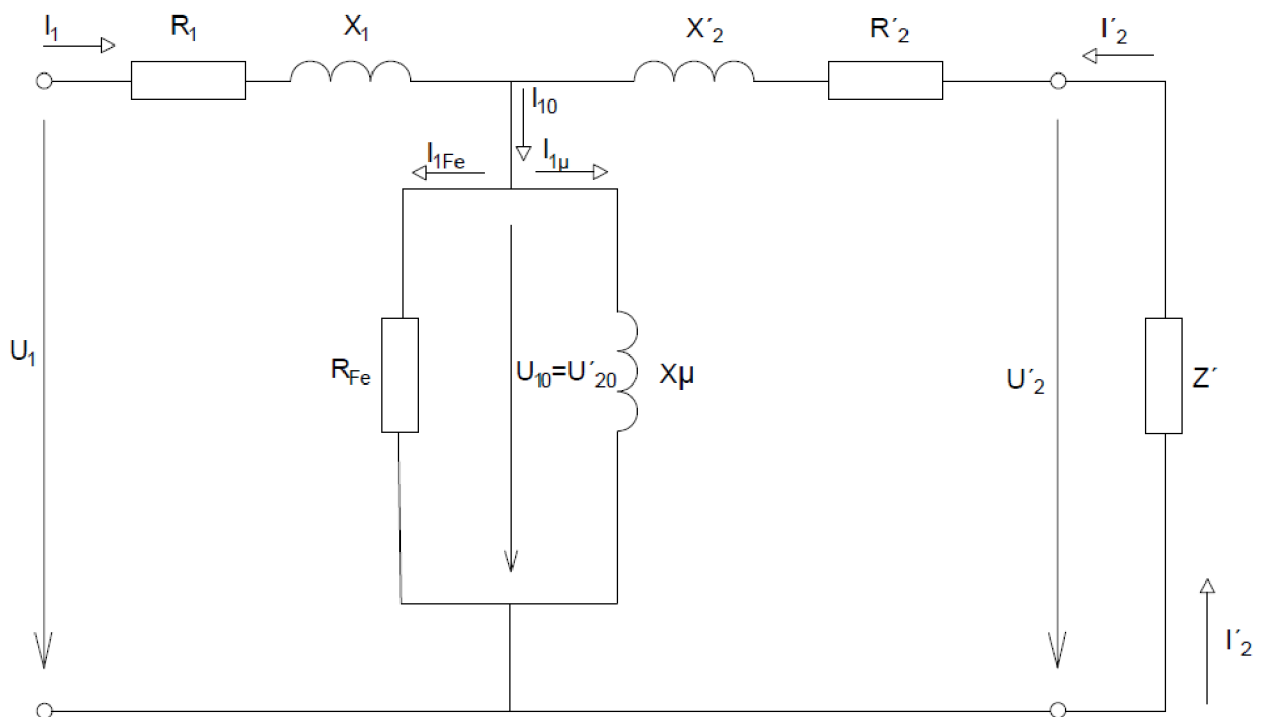
Jistící třídy transformátorů mají nižší požadavky na chybu napětí a chybu úhlu než třídy jistící. Při napětí, které odpovídá jmenovitému kmitočtu a v rozsahu 5 % až do výše zvýšeného napětí nesmí chyby jistící třídy přesáhnout hodnoty v tab. 2.

Tabulka 2 – Dovolené meze chyb pro jistící třídy (převzato z [1])

Třída přesnosti - $T_p$	Chyba napětí +- $\epsilon_u$	Chyba úhlu +- $\delta_u$
	Měřicí rozsah 80 % až 100 % $U_{1n}$	
	%	minut
3P	3	120
6P	6	240

## 4 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU NAPĚTÍ

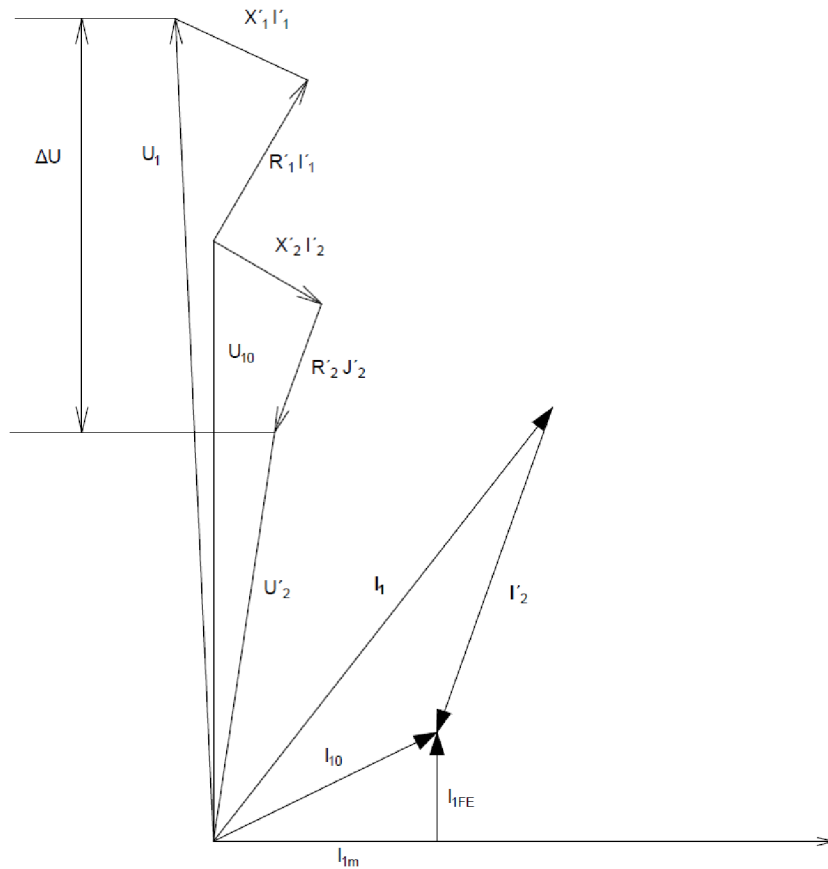
Náhradní schéma pro přístrojový transformátor napětí se nijak významně neliší od náhradního schématu běžného transformátoru napětí. Protože přístrojový transformátor napětí slouží zejména k měření a jištění, je pro nás nejdůležitější úbytková část ve fázorovém diagramu při zachování skutečných směrů proudu a napětí. Fázorové diagramy vychází z náhradního schématu, tudíž budou fázorové diagramy pro přístrojový transformátor napětí téměř shodné s fázorovými diagramy pro běžné transformátory napětí. Rozdíl bude pouze v kladení důrazu na celkovou chybu měření. Náhradní schéma napěťového transformátoru je uvedeno na obr. 6.



Obrázek 6 - Náhradní schéma napěťového transformátoru

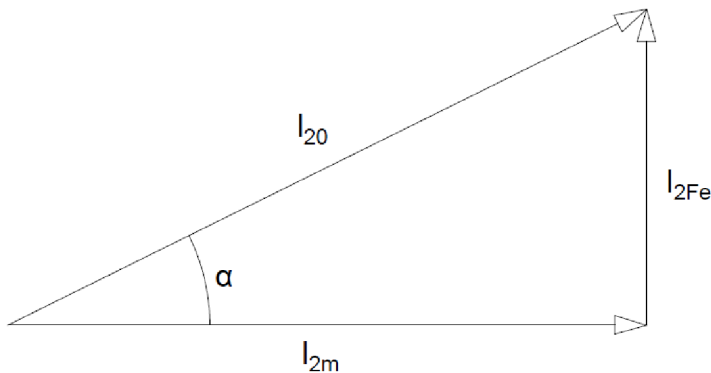
Při kreslení fázorového diagramu vycházíme z fázoru napětí  $U'_2$  a položíme ho tak, aby byl ve směru svíslé osy. Zároveň bude fázor  $U'_2$  svírat kolmý směr vzhledem k fázoru magnetického toku. Nedopustíme se tím nikterak velké chyby, protože úhel mezi fázorem  $U'_2$  a  $U'_{20}$  bývá zanedbatelné velikosti.

Horní část fázorového diagramu je pro nás důležitá pro správné odvození chyb transformátoru napětí. Nejvíce nás v tomto případě bude zajímat fázor úbytku napětí  $\Delta U$  a jeho jednotlivé složky. Následujícím krokem bude tedy nakreslit pouze úbytkovou část fázorového diagramu, kde potom můžeme znaménko mínus u fázoru  $I_2$  zcela zanedbat. Jako výchozí fázor si zvolíme fázor  $U_2$ . Pro rozdílné zatížení se nám následně bude měnit fázor  $U_1$ . Jelikož jsme zvolili jako referenční hodnotu fázor  $U_2$ , je vhodné užívat hodnoty napětí, impedance a proudu v přepočteném tvaru pro sekundární závity.  $I_{20}$  je tedy proud naprázdno přepočtený na sekundární počet závitů  $I'_{10}$ .

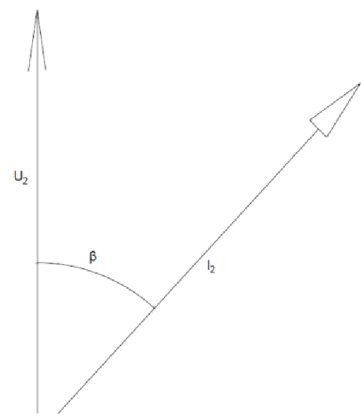


Obrázek 7 - Fázorový diagram napěťového transformátoru (převzato z [1])

Fázory  $U_1$  a  $U_2'$  jsou konstruovány jako rovnoběžné, protože úhel  $\delta_u$  je u přístrojových transformátorů napětí maximálně 1 stupeň. Se změnou zátěže si můžeme všimnout změn v poloze koncového bodu fázoru  $U_2'$ , který se bude pohybovat po úsečce AB. Úsečka AB nám v tomto případě představuje jmenovité zatížení v bodě B a v bodě A poté představuje stav na prázdko.

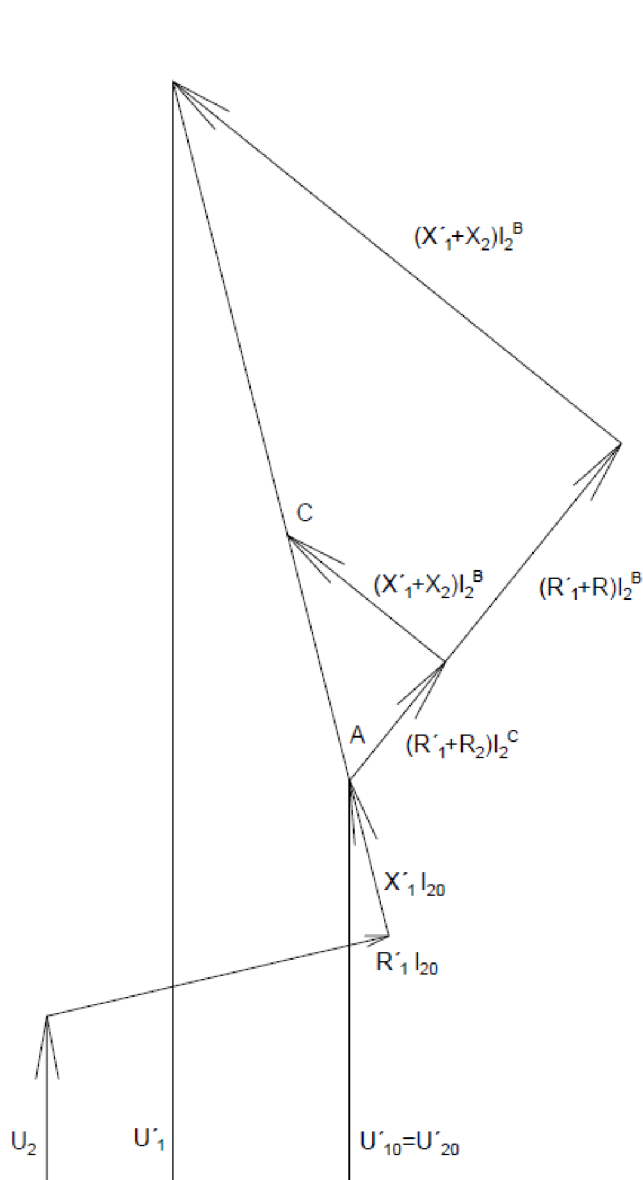


Obrázek 8 - Fázorový diagram 1 (převzato z [1])

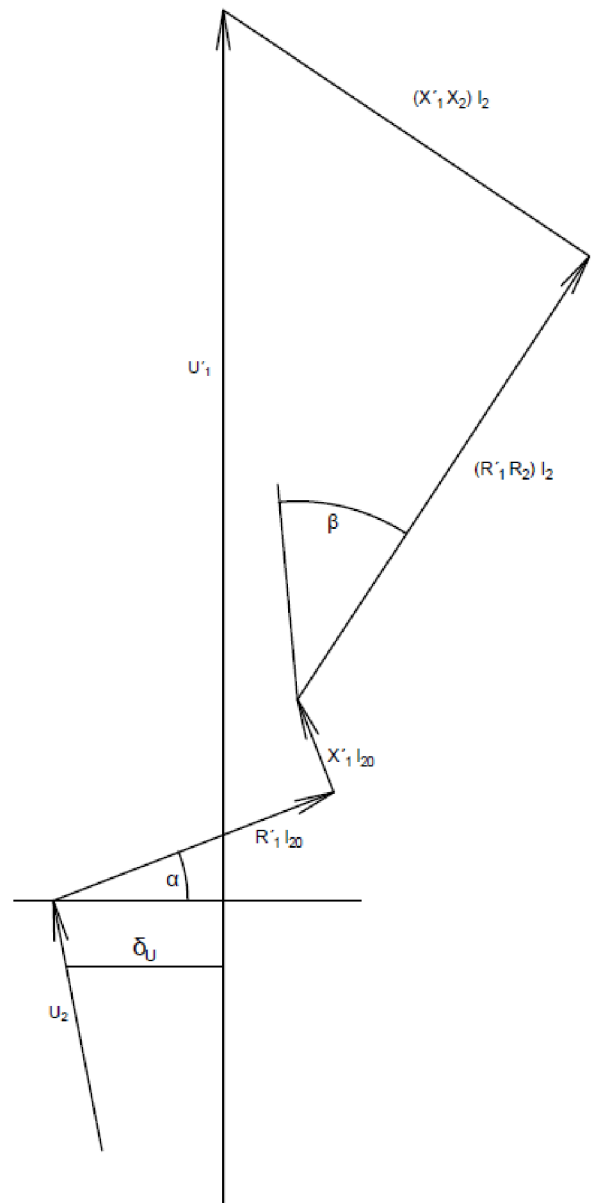


Obrázek 9 - Fázorový diagram 2 (převzato z [1])

Bod C pro výše uvedené změny bude následně představovat obecnou zátěž sekundární strany. Pokud budeme uvažovat měnící se napětí  $U_1$ , koncový bod fázoru  $U'_1$  se bude pohybovat jako na uvedeném obrázku 12.

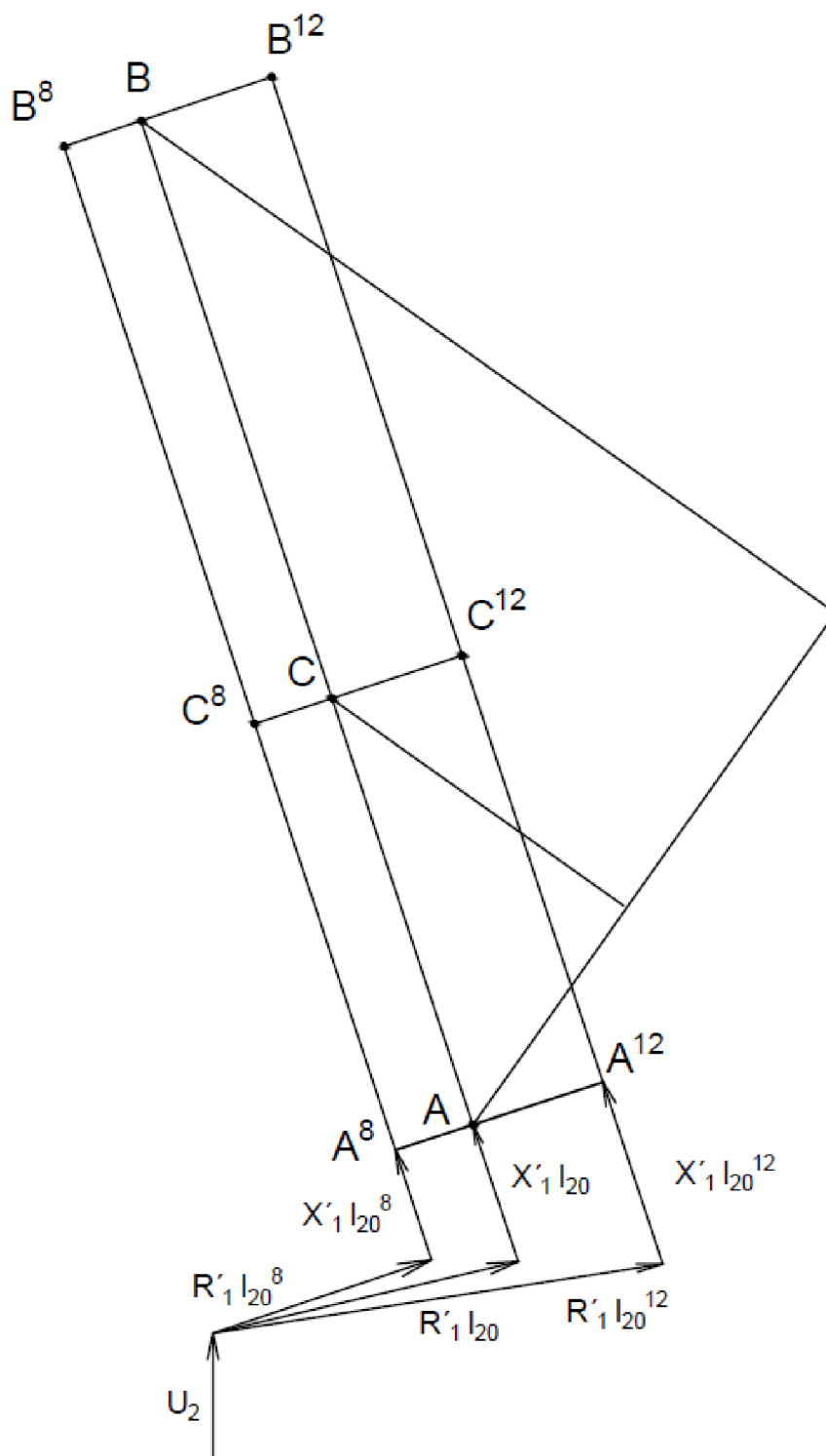


Obrázek 11 - Fázorový diagram transformátoru napětí (převzato z [1])



Obrázek 10 - Fázorový diagram transformátoru napětí (převzato z [1])

Zvýšení napětí na hodnotu 120 % jsou symbolizovány body  $A^{12}$ ,  $B^{12}$ ,  $C^{12}$ , naopak pro napětí odpovídající 80 % nominální hodnoty odpovídají body  $A^8$ ,  $B^8$ ,  $C^8$ . Změnami magnetické indukce pomocí proudu  $I_{20}$  lze odvodit výslednou polohu koncového bodu fázoru napětí  $U'_1$ . Zvýšení napětí na hodnotu 120 % jsou symbolizovány body  $A^{12}$ ,  $B^{12}$ ,  $C^{12}$ , naopak pro napětí odpovídající 80 % nominální hodnoty odpovídají body  $A^8$ ,  $B^8$ ,  $C^8$ . Změnami magnetické indukce pomocí proudu  $I_{20}$  lze odvodit výslednou polohu koncového bodu fázoru napětí  $U'_1$ . [1]



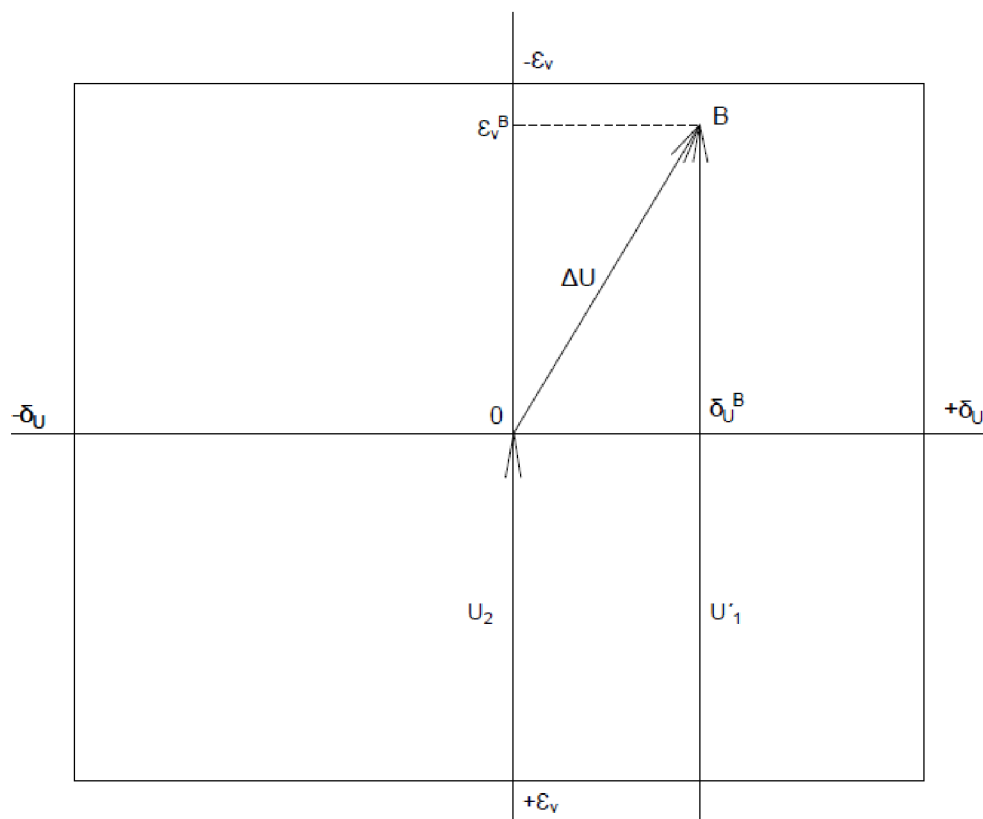
Obrázek 12 - Fázorový diagram vlivu magnetické indukce na poloze koncového bodu (převzato z [1])

## 5 CHYBY PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU NAPĚTÍ

Protože hlavní funkcí přístrojových transformátorů je měření a jištění elektrických obvodů, chyba jejich převodu je jedním z nejdůležitějších parametrů. Obecně platí, že čím přesnější je převod transformátoru, tím menší zátěž jsme schopni připojit na sekundární straně. Především pravidlo platí zejména pro sériově vyráběné přístrojové transformátory, které mají pevně dané maximální rozměry vinutí. Vysoké výkony na sekundární straně přístrojových transformátorů byly využívány zejména v minulosti jako napájecí výkony mechanických relé, která rozpojovala danou fázi při chybovém stavu. V dnešní době již jsou vývody sekundární strany přístrojových transformátorů připojeny na inteligentní ochrany a odpínací zařízení jsou napájeny z jiných zdrojů.

### 5.1 Zobrazení fázorového diagramu chyb

Jako referenční část fázorového diagramu pro určení chyb nám poslouží pouze horní část fázorového diagramu, která se skládá z úbytků napětí na jednotlivých složkách impedancí transformátoru. Bod fázoru  $U_2$  pro nás bude referenčním bodem,  $\Delta U$  potom fázorovou chybou, která je udávána rozdílem fázorů  $U_1'$  a  $U_2$ . Protože důležitým údajem je pro nás zejména chyba napětí  $\varepsilon_u$  a chyba úhlu  $\delta_u$ , rozložíme fázorovou chybu  $\Delta U$  a dvě na sebe kolmé složky. Fázory  $U_1'$  a  $U_2$  můžeme považovat za navzájem rovnoběžné díky velmi malému úhlu  $\delta_u$ . Výsledek rozložení je zobrazen na obr. 13.



Obrázek 13 - Pole dovolených chyb (převzato z [1])



## 5.2 Pole dovolených chyb

Chyba úhlu je spolu s chybou napětí vynášena do komplexního diagramu, kde jsou tyto hodnoty ohraničovány hranicemi danými dle třídy přesnosti. Dostáváme tak dovolené pole chyb v komplexním diagramu. Koncový bod fázoru  $U'_1$  se tedy může pohybovat jen uvnitř ohraničeného prostoru v komplexním diagramu. Chyba úhlu je zásadně uvedena v minutách. Fázor  $\Delta U$  je naopak zobrazován v procentuálním zobrazení. Konstrukce komplexního diagramu chyb je zobrazeno na obr. 14.

Pro úhel  $\delta_u$  platí následující vztah [1]

$$tg\delta_u = \frac{a}{100} \quad 5.1$$

$\delta_u$  - Chyba úhlu transformátoru (min)

$a$  - Poměrná hodnota chyby úhlu (min)

V případě že  $U_2 = 100\%$  lze tento vztah pro uvažované úhly uvést [1]

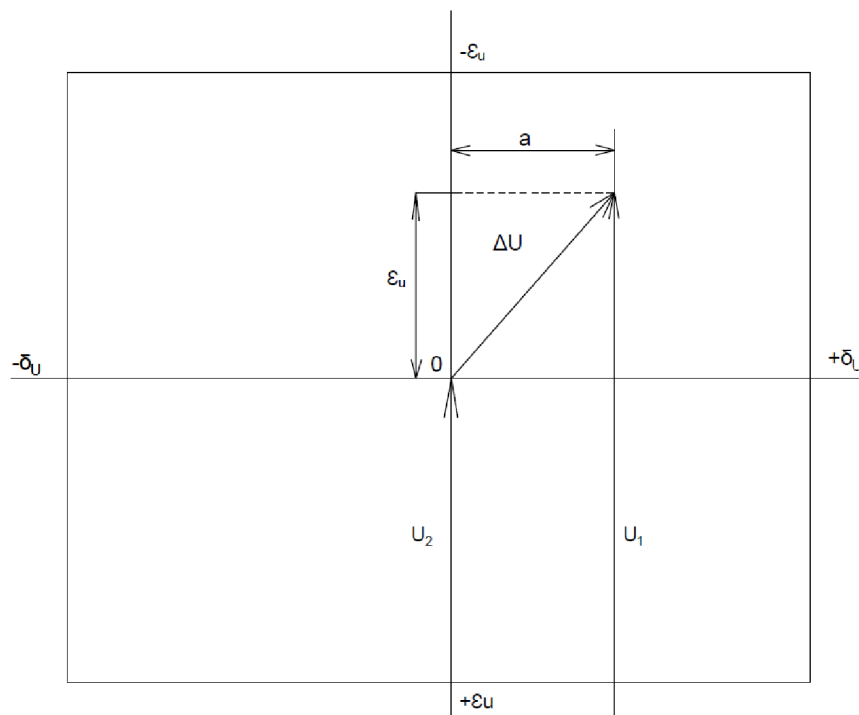
$$\delta_u \cong a \quad 5.2$$

$$\delta_u \cong 100 * \frac{\pi}{180 * 60} * a = 0,291a \quad 5.3$$

$$a = 0,02191 * \delta_u [min] \quad 5.4$$

$\delta_u$  - Chyba úhlu transformátoru (min)

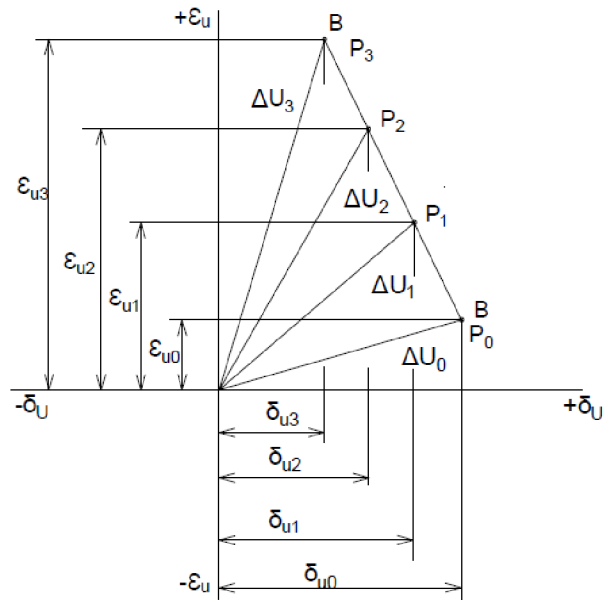
$a$  - Poměrná hodnota chyby úhlu (min)



Obrázek 14 - Pole dovolených chyb (převzato z [1])

### 5.3 Chyby přístrojového transformátoru napětí v závislosti na veličinách

Jednotlivé chyby podle závislostí budou popisovány a definovány dle níže uvedeného fázorového diagramu na obr. 15. Mezi veličiny, které se často mění v závislosti na definici potřebných parametrů zákazníkem, se řadí zejména zátěž a napětí.



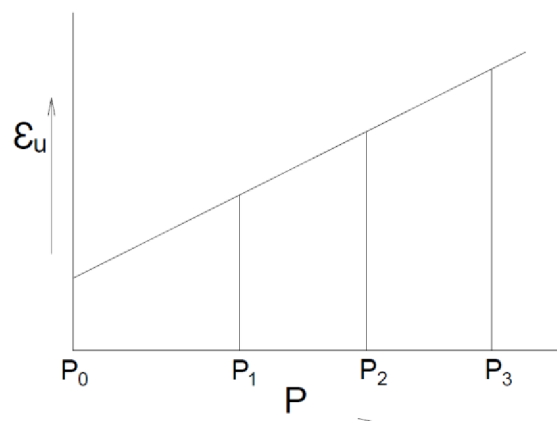
Obrázek 15 - Fázorový diagram chyb v závislosti na zátěži a napětí (převzato z [1])

#### 5.3.1 Chyba v závislosti na zátěži

Úsečka AB je přeponou v trojúhelníku mezi proudem  $I_2$  a úbytkem napětí  $\Delta U_x$ . Úsečka tedy tvoří samotnou stupnici zátěže, ze které lze určit závislost chyby v komplexním diagramu chyb v závislosti chyby napětí na břemeni.

#### 5.3.2 Chyba v závislosti na napětí

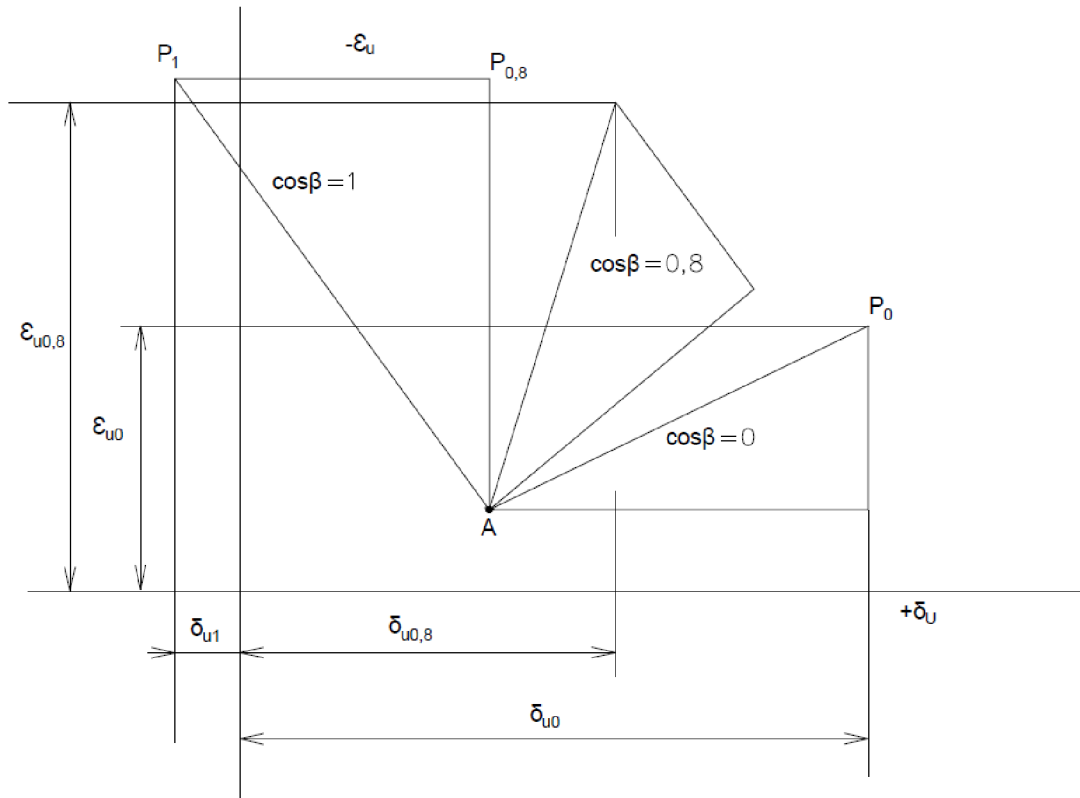
Závislosti chyby na napětí má lineární tvar přímky pouze v případě, že se v dané chvíli nachází bod v lineární části magnetizační charakteristiky. Pokud se dostaneme do blízkosti magnetizačního kolene křivky, dojde k deformaci výše uvedených závislostí.



Obrázek 16 - Lineární závislost chyby na napětí (převzato z [1])

### 5.3.3 Závislost chyb na sekundárním účinníku $\cos\beta$

Pokud bod naprázdno A zůstává na stejném místě a natočením měníme pozici trojúhelníku úbytku napětí a proudu  $I_2$ , dochází ke změně chyby  $\varepsilon_{uX}$ .



Obrázek 17 - Závislost chyb na sekundárním účinníku (převzato z [1])

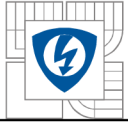
### 5.3.4 Závislost chyb na frekvenci

Důležitým parametrem přístrojového transformátoru napětí je rozptylová reaktance. Rozptylová reaktance je závislá na kmitočtu a je popsána níže uvedeným vztahem. S každou změnou kmitočtu také souvisí magnetizační příkon železa a změna činných ztrát v železe. [1]

$$X = 2\pi fL \quad 5.5$$

- $X$  - Reaktance ( $\Omega$ )
- $a$  - Poměrná hodnota chyby úhlu (min)
- $f$  - Frekvence (Hz)
- $L$  - Indukčnost (H)





Chyba napětí způsobená proudem naprázdno [1]

$$\varepsilon_{u0R} = \frac{100}{U_2} R'_1 I_{20} \sin\alpha \quad [%, V, A, \Omega, -] \quad 5.8$$

$$\varepsilon_{u0X} = \frac{100}{U_2} X'_1 I_{20} \sin\alpha \quad [%, V, A, \Omega, -] \quad 5.9$$

Chyba úhlu způsobená zatěžovacím proudem  $I_2$  [1]

$$\delta_{uR} = \frac{3440}{U_2} = (R'_1 + R_2) I_2 \sin\beta \quad [min, V, A, \Omega, -] \quad 5.10$$

$$\delta_{uX} = \frac{3440}{U_2} = (X'_1 + X_2) I_2 \cos(180 - \beta) \quad [min, V, A, \Omega, -] \quad 5.11$$

Chyba úhlu způsobená proudem naprázdno [1]

$$\delta_{u0R} = \frac{3440}{U_2} R'_1 I_{20} \cos\alpha \quad [min, V, A, \Omega, -] \quad 5.12$$

$$\delta_{u0X} = \frac{3440}{U_2} X'_1 I_{20} \cos(90 + \alpha) \quad [min, V, A, \Omega, -] \quad 5.13$$

Výsledná chyba napětí je následně rovna [1]

$$\varepsilon_u = \varepsilon_{u0R} + \varepsilon_{u0X} + \varepsilon_{uR} + \varepsilon_{uX} \quad [%] \quad 5.14$$

Výsledná chyba úhlu [1]

$$\delta_u = \delta_{u0R} + \delta_{u0X} + \delta_{uR} + \delta_{uX} \quad [min] \quad 5.15$$

Průchozí odpor [1]

$$R = R'_1 + R_2 \quad [\Omega] \quad 5.16$$

Průchozí reaktance [1]

$$X = X'_1 + X_2 \quad [\Omega] \quad 5.17$$

Průchozí impedance [1]

$$\mathbf{Z} = R + jX \quad [\Omega] \quad 5.18$$

Z následujících rovnic a fázorových diagramů lze souhrnně říct, že největší vliv na chybu úhlu má hodnota magnetické impedance a na chybu napětí má největší vliv hodnota složek průchozí impedance.

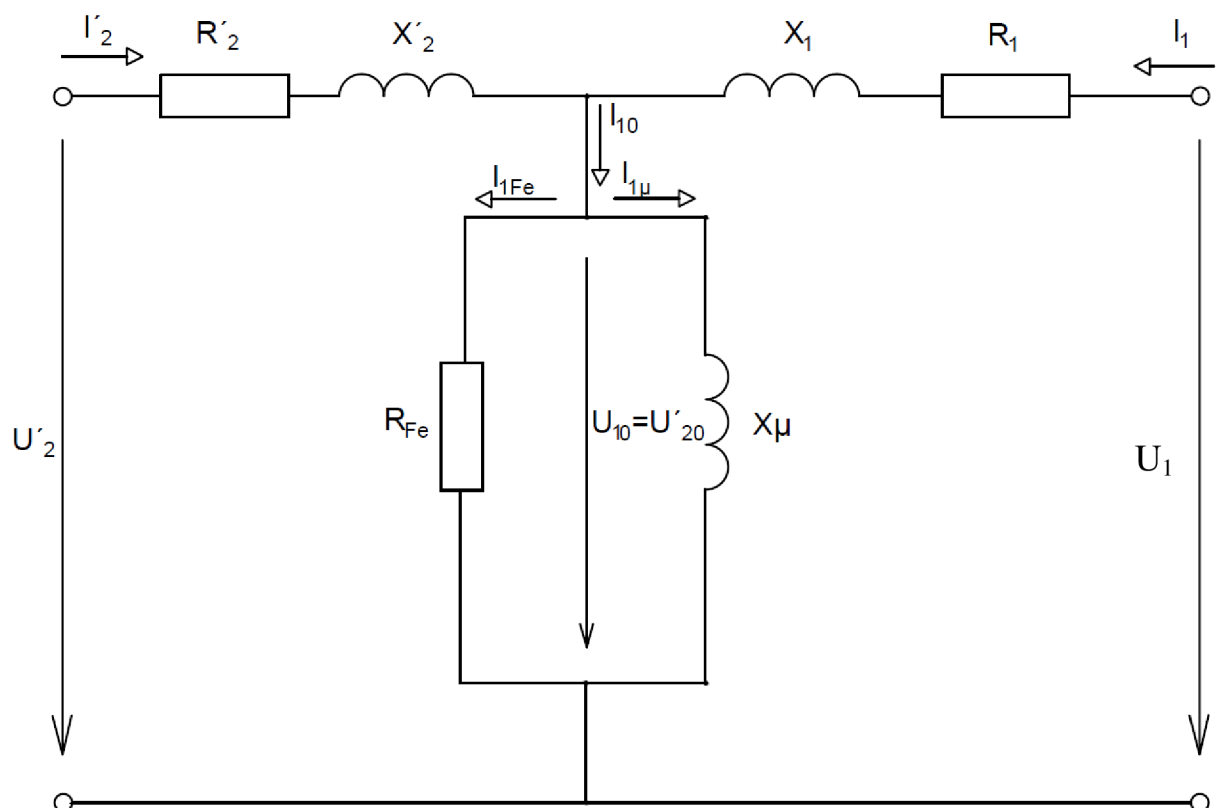
## 6 URČENÍ PRVKŮ NÁHRADNÍHO SCHÉMATU

Vlastnosti přístrojového transformátoru napětí jsou dány parametry a velikostí jednotlivých prvků, které jsou v transformátoru obsaženy. V obvodu si můžeme všimnout přidané kapacity v paralelní větvi transformátoru. Kapacita zde reprezentuje kapacitu vinutí mezi jednotlivými vrstvami, která vzniká v důsledku nedostatečné izolace mezi vrstvami vinutí. Silnější vrstva izolace nelze kvůli velkému počtu primárních závitů použít, protože by došlo ke zvětšení rozměru transformátoru. Nebylo by tedy možné například splnit DIN standard, který přesně udává rozměry pro daný transformátor.

Celkově se dá tvrdit, že požadavky na kompaktnost přístrojových transformátorů jsou velké a velikost rozměrů má často větší prioritu než parametry.

Kapacitou se nebudeme u prvních měření zabývat, ani ji nebudeme do výpočtů zahrnovat, na konci práce potom provedeme ukázkou výpočtu této kapacity a shrneme její celkový vliv na chod transformátoru a případné nebezpečí.

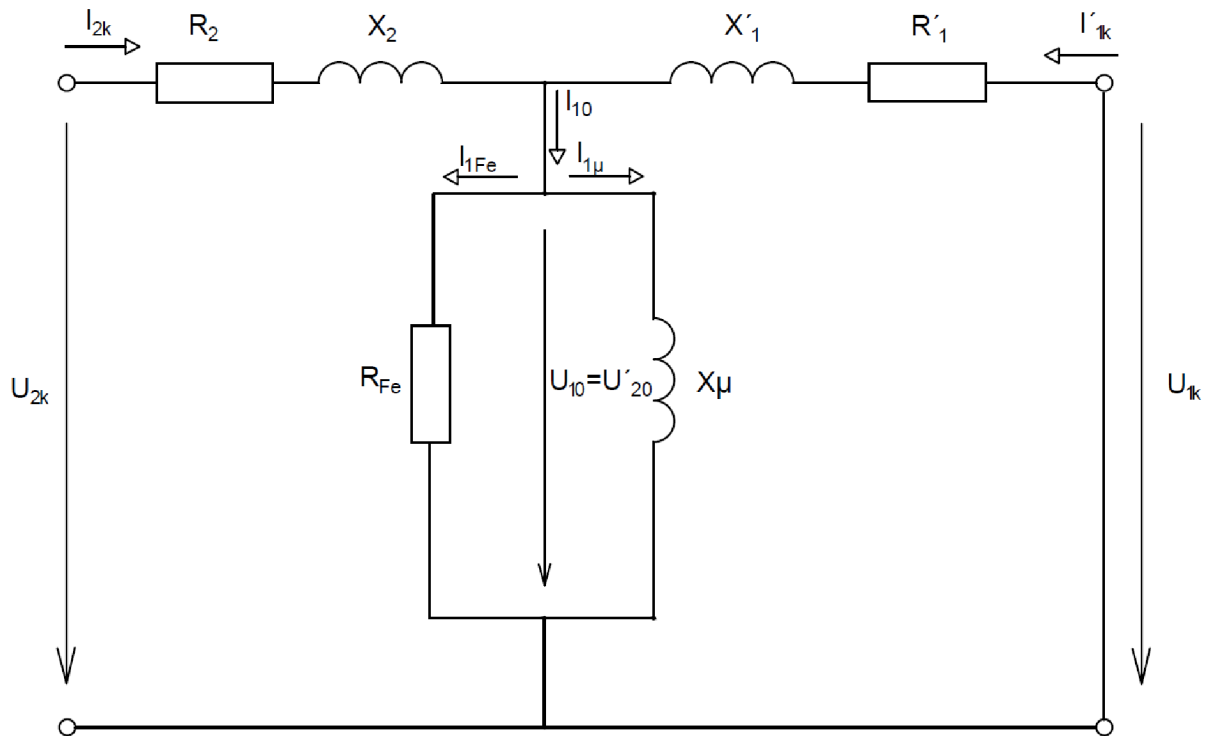
Chování jednotlivých prvků transformátorů budeme sledovat v závislosti na měnící se frekvenci a hodnoty vyneseme do grafů. Změna frekvence a určení rezonance  $X_1$  a  $X_c$  povede k určení hodnoty kapacity.



Obrázek 19 - Náhradní schéma transformátoru

## 6.1 Teorie měření napět'ového transformátoru nakrátko

Transformátor v zapojení nakrátko se nachází ve stavu, kdy při napájeném vstupním vinutí je výstupní vinutí spojeno do zkratu. Proudů  $I_{1k}$  a  $I'_{2k}$  jsou v ustáleném stavu. Svorkové napětí  $U_1$  je nulové. Měření bylo provedeno ze sekundární strany transformátoru.



Obrázek 20 - Schéma zapojení transformátoru ve stavu nakrátko

Rozptylová reaktance primárního vinutí je ve zjednodušeném obvodu na obrázku 18. označena  $X'_{L1\sigma}$ . Hodnota pro rozptylovou reaktanci sekundární cívky je  $X_{L2\sigma}$ . Činný odpor  $R_1$  lze přepočíst na činný odpor primární cívky  $R'_1$  pro hodnoty primárního napětí pomocí převodu transformátoru  $p$ .

$$p = \frac{N_1}{N_2} \quad 6.1$$

- $p$  - Převod transformátoru (-)
- $N_1$  - Počet primárních závitů (-)
- $N_2$  - Počet sekundárních závitů (-)

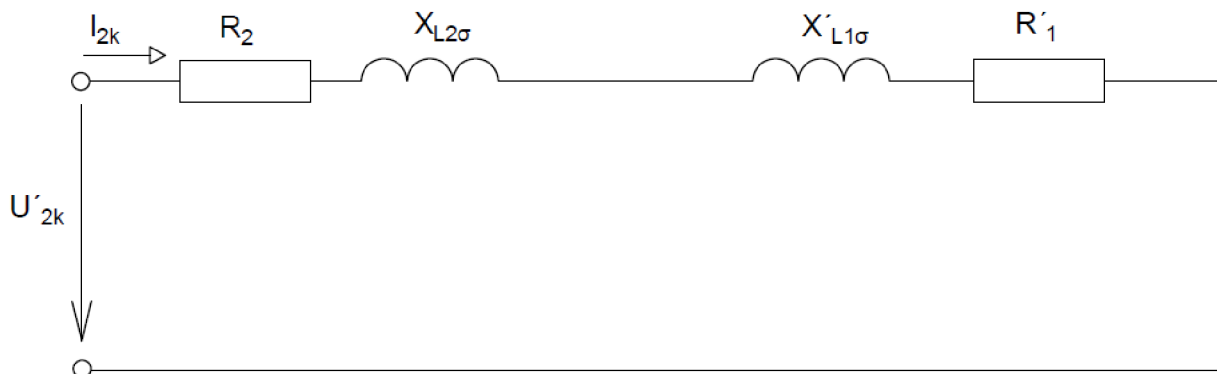
$$R'_1 = R_1 * p^2 \quad 6.2$$

- $R'_1$  - Přepočítaný odpor primárního vinutí ( $\Omega$ )
- $R_1$  - Odpor primárního vinutí ( $\Omega$ )
- $p$  - Převod transformátoru (-)

Abychom ošetřili rozdíl napětí jednotlivých vinutí primární a sekundární cívky, přepočteme pomocí výše uvedených vztahů hodnoty odporu a rozptylové reaktance sekundární cívky na hodnoty primárního napětí.

Příčnou větev při měření nakrátko zanedbáváme. Této úpravy se můžeme dopustit, protože příčná větev má řádově vyšší impedanci než větev podélná. Poměr impedancí bývá přibližně  $Z_{\text{příčná}} : Z_{\text{podélná}}$  v poměru  $10^4 : 1$ .

Náhradní schéma lze tedy po výše popsanych úpravách zakreslit v zjednodušené podobě následovně.



Obrázek 21 - Zjednodušené schéma zapojení transformátoru nakrátko

## 6.2 Měření transformátoru napětí nakrátko

Z tabulky č. 5, která obsahuje naměřené hodnoty pro rozdílné frekvence, použijeme v následujících výpočtech hodnotu pro 50 Hz. Z těchto hodnot vypočteme hodnoty prvků pro zjednodušené schéma transformátoru v zapojení nakrátko.

Určení převodu transformátoru bude prvním krokem při vlastním výpočtu prvků.

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{27000 : \sqrt{3}}{110 : \sqrt{3}} = 245,45 \quad 6.3$$

Následujícím krokem je převedení hodnot prvků sekundárního vinutí na napětí primárního vinutí. Změřené hodnoty, ze kterých budeme vycházet, jsou uvedeny v tabulce č. 3.

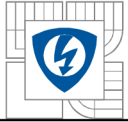
Tabulka 3- Tabulka naměřených hodnot pro 50Hz

$R_2$	4,85 k $\Omega$
$R'_1$	186 m $\Omega$
$U_{2k}$	164 V
$I_{2k}$	666 mA

$$R'_2 = R_2 * p^2 = 186 * 10^{-3} \times 245,45^2 \quad 6.4$$

$$R'_2 = 11,206 \text{ k}\Omega \quad 6.5$$





$$I'_{1k} = \frac{I_k}{p} = \frac{666mA}{225} = 2,96 mA \quad 6.6$$

Z převedených hodnot lze nyní vyjádřit celkový modul podélné impedance  $|z|$ .

$$|z| = \frac{U_{2k}}{I'_k} = \frac{164 V}{2,96 \times 10^{-3}} = 55,405 k\Omega \quad 6.7$$

### 6.3 Určení rozptylových reaktancí pomocí odporového rozdělení

Měřením pomocí ohmmetru jsme zjistili odpory jednotlivých vinutí. K určení celkové rozptylové reaktance použijeme tedy vztahu pro celkovou impedanci.

$$R_c = R_2 + R'_1 = 4,850 * 10^3 + 11,206 * 10^3 = 16,056 k\Omega \quad 6.8$$

$$X_{L\sigma} = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad 6.9$$

$$X_{L\sigma} = \sqrt{(55,405 * 10^3)^2 - (16,056 * 10^3)^2} = 53,028 k\Omega \quad 6.10$$

Pomocí aproximace nyní určíme rozdělení rozptylové reaktance pro primární a sekundární vinutí. U tohoto kroku předpokládáme, že rozptylové reaktance jsou rozděleny ve stejném poměru jako odpory primárního a sekundárního vinutí.

$$X_{L\sigma} = X'_{1L\sigma R} + X_{2L\sigma R} \quad 6.11$$

$X_{L\sigma}$  - Celková rozptylová reaktance ( $\Omega$ )

$X'_{1L\sigma R}$  - Přepočítaná rozptylová reaktance primárního vinutí ( $\Omega$ )

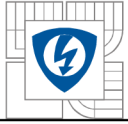
$X_{2L\sigma R}$  - Rozptylová reaktance sekundárního vinutí ( $\Omega$ )

$$\delta_{2X_{L\sigma R}} = \frac{R_2}{R_2 + R'_1} = \frac{4,850}{4,850 + 11,206} = 0,302 \quad 6.12$$

$\delta_{2X_{L\sigma R}}$  - Poměrná hodnota přerozdělení rozptylové reaktance sekundárního vinutí (-)

$R_2$  - Odpor sekundárního vinutí ( $\Omega$ )

$R'_1$  - Přepočítaný odpor primárního vinutí ( $\Omega$ )



$$\delta'_{1X_{L\sigma R}} = 1 - \delta_{2X_{L\sigma r}} = 1 - 0,302 = 0,698 \quad 6.13$$

$$X'_{1L\sigma R} = \delta'_{1X_{L\sigma R}} * X_{L\sigma} = 53,028 \times 10^3 * 0,698 = 37,014 \text{ k}\Omega \quad 6.14$$

$$X_{2L\sigma R} = \delta_{2X_{L\sigma r}} * X_{L\sigma} = 53,028 * 10^3 * 0,302 = 16,014 \text{ k}\Omega \quad 6.15$$

## 6.4 Určení rozptylových reaktancí ekvivalentním rozdělením

Metoda ekvivalentního rozdělení je nejjednodušší možnou variantou, ale chyba, které se pomocí tohoto rozdělení dopustíme však není zanedbatelná.

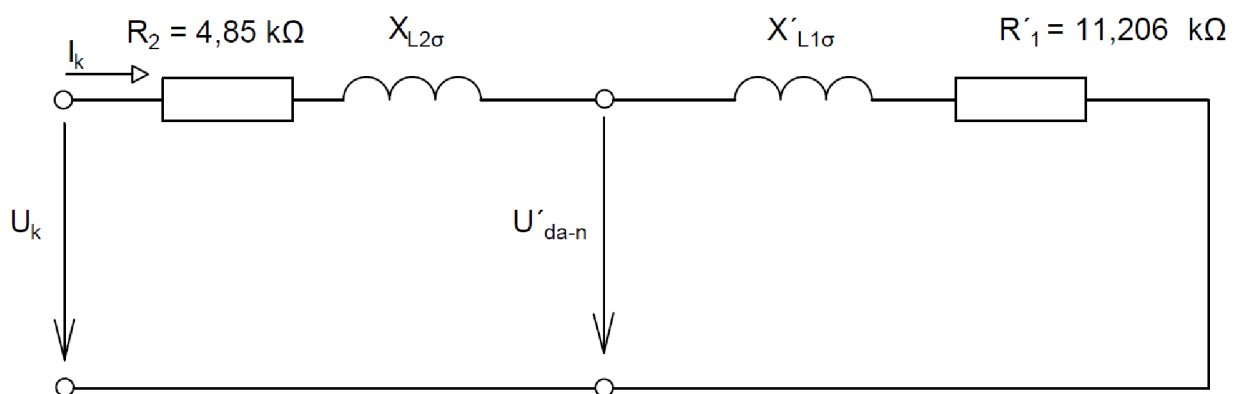
$$X'_{1L\sigma e} = X_{2L\sigma e} = \frac{X_{L\sigma}}{2} = \frac{53,028}{2} = 26,514 \text{ k}\Omega \quad 6.16$$

## 6.5 Určení rozptylových reaktancí pomocí meziobvodu da-n

Nejpřesnější metodou pro určení rozptylových reaktancí je využití meziobvodu da-n. Problém se může vyskytnout v případě transformátoru, který má pouze jedno vinutí. V případě transformátoru s jedním vinutím nezbyvá tedy jiná možnost, než použít metodu pomocí ekvivalentního rozdělení nebo poměru odporu vinutí. Pro meziobvod da-n v zásadě platí, že má jiný převod než vinutí měřící, je tedy zapotřebí vypočítat nový převod transformátoru pro vinutí da-n. Přesné hodnoty lze vždy určit ze štítku transformátoru.

$$p_{da-n} = \frac{27\,000 : \sqrt{3}}{110 : 3} = 425,14 \quad 6.17$$

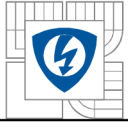
Po přidání meziobvodu do zjednodušeného schématu dostáváme následující obvod.



Obrázek 22 - Náhradní schéma s meziobvodem da-n

Přepočteme naměřené hodnoty na velikost primárního napětí pomocí převodu transformátoru  $p_{da-n}$ .

$$U'_{da-n} = p_{da-n} * U_{da-n} = 0,220 * 425,14 = 93,530 \text{ V} \quad 6.18$$



Podle zjednodušeného schématu pro obvod transformátoru nakrátko sestavíme Fázorový diagram, podle kterého budeme schopni určit hodnoty rozptylových reaktancí pro primární a sekundární vinutí.

Výpočet rozptylové reaktance pro sekundární vinutí.

$$U_{R_2} = I_k * R_2 = 2,96 * 10^{-3} * 4,85 * 10^3 = 14,356 \text{ V} \quad 6.19$$

$$U_{X_{2L\sigma}} = X_{2L\sigma} * I_k = \sqrt{U'_{da-n}{}^2 - U_{R_2}{}^2} = \sqrt{93,530^2 - 14,356^2} = 92,391 \text{ V} \quad 6.20$$

$$X_{2L\sigma} = \frac{U_{X_{2L\sigma}}}{I_k} = \frac{92,391}{2,96 * 10^{-3}} = 31,213 \text{ k}\Omega \quad 6.21$$

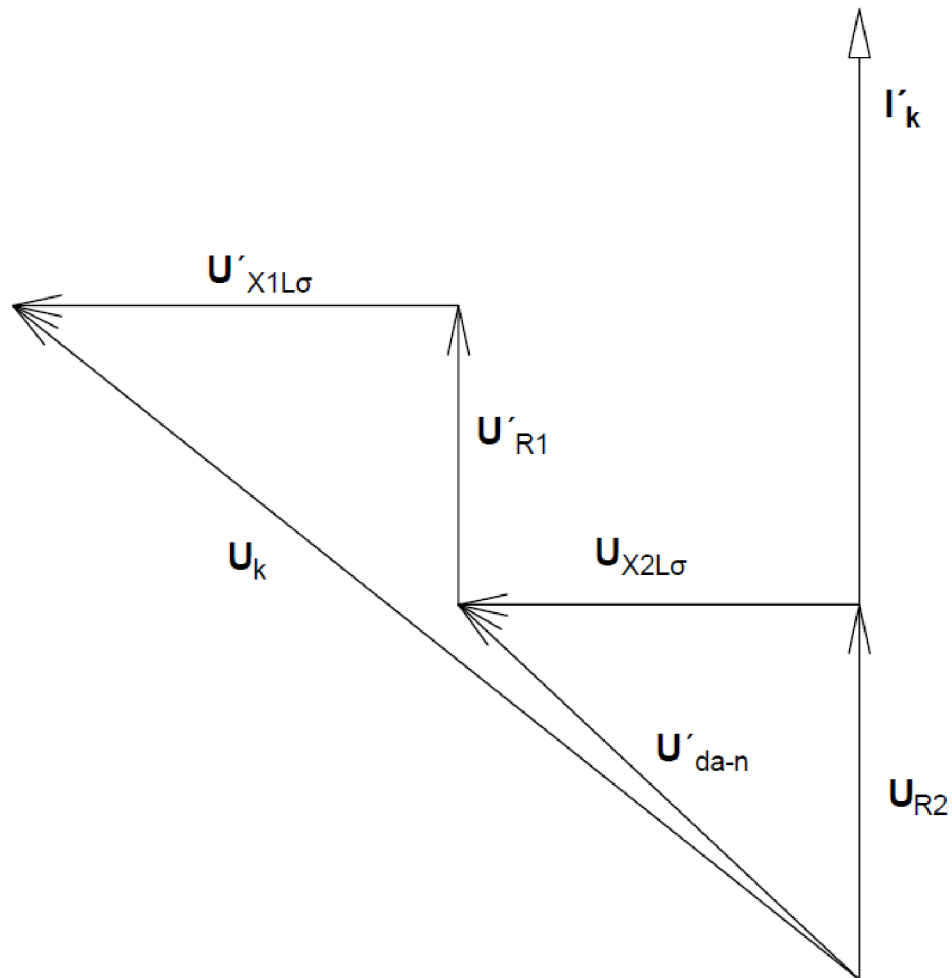
Výpočet rozptylové reaktance pro primární vinutí.

$$U_{R'_1} = I_k * R'_1 = 2,96 * 10^{-3} * 11,206 * 10^3 = 33,170 \text{ V} \quad 6.22$$

$$U'_{X_{1L\sigma}} = X'_{1L\sigma} * I_k = \sqrt{U_k{}^2 - (U_{R'_1} + U_{R_2})^2} - U_{X_{2L\sigma}} \quad 6.23$$

$$U'_{X_{1L\sigma}} = \sqrt{164^2 - (33,170 + 14,356)^2} - 92,391 = 64,559 \text{ V}$$

$$X'_{1L\sigma} = \frac{U'_{X_{1L\sigma}}}{I_k} = \frac{64,559}{2,96 * 10^{-3}} = 21,810 \text{ k}\Omega \quad 6.24$$



Obrázek 23 - Fázorový diagram rozptylových reaktancí

Z porovnání hodnot rozptylových reaktancí, které jsme vypočetli pomocí sestrojení fázorového diagramu a aproximace můžeme vidět, že hodnoty jsou značně odlišné.

Odporové rozdělení

$$X'_{1L\sigma R} \cong 37 \text{ k}\Omega$$

$$X_{2L\sigma R} \cong 16 \text{ k}\Omega$$

Ekvivalentní rozdělení

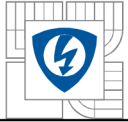
$$X'_{1L\sigma e} \cong 27 \text{ k}\Omega$$

$$X_{2L\sigma e} \cong 27 \text{ k}\Omega$$

Určení pomocí mezi obvodu da-n

$$X'_{1L\sigma} \cong 22 \text{ k}\Omega$$

$$X_{2L\sigma} \cong 31 \text{ k}\Omega$$



Z výsledků je vidět, že při rozdělení pomocí odporového dělení dochází ke špatnému určení velikosti rozptylové reaktance primárního vinutí a sekundárního vinutí. Hodnota rozptylové reaktance je zde větší pro primární vinutí. My jsme však měřením s použitím meziobvodu da-n zjistili, že větší hodnoty nabývá rozptylová reaktance vinutí sekundárního. Protože metodu s použitím meziobvodu da-n uvažujeme jako referenční, je metoda odporového rozdělení nevyhovující.

Pokud tedy transformátor není vybaven mezi obvodem da-n, je podle provedeného měření použitelná pouze metoda ekvivalentního rozdělení, tedy předpoklad, že rozptylové reaktance jsou rozloženy rovnoměrně v obou vinutích.

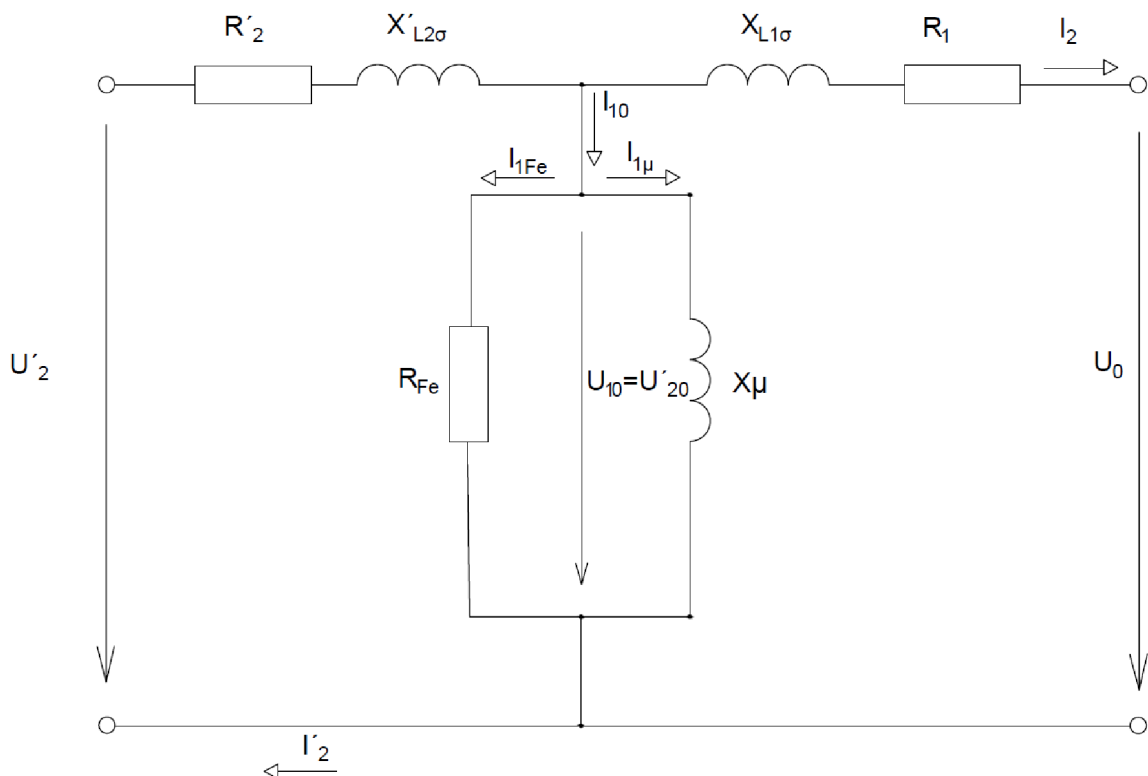
## 7 MĚŘENÍ PŘÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORU

### NAPRÁZDNO

Jedná se o stav transformátoru, při kterém proud  $I_2$  je roven nule. Primárním vinutím však proud protéká, jedná se o proud magnetizační  $I_{10}$ . Tento proud je nutný pro vybudění magnetického pole v magnetickém obvodu transformátoru při jmenovitém napětí  $U_1$ . Tento proud se běžně skládá ze dvou složek. První složkou je proud induktivního charakteru a je posunut o  $90^\circ$  elektrických za fázorem proudu. Jedná se o indukčnost  $X_\mu$  a tím pádem i o hlavní tok v magnetickém obvodu. Druhá složka je tvořena vířivými proudy a hysterezními ztrátami. Lze ji vyjádřit jako odpor  $R_{FE}$ .

My však při vyhodnocování naměřených hodnot a výpočtů budeme uvažovat, že spolu s indukčností  $X_\mu$  nám v obvodu figuruje i kapacitance  $X_c$ . Kapacitance vzniká  $X_c$  mezi jednotlivými vrstvami vinutí. Budeme tedy uvažovat, že proud protékající kapacitou  $C$  kompenzuje proud protékající indukčností  $X_\mu$ .

### 7.1 Měření naprázdno bez uvažování kapacity pro 40 Hz



Prvním krokem bude opět přepočtení sekundárních hodnot na primární napětí pomocí převodu transformátoru. Následovat bude určení příčné admittance. Hodnotu příčné admittance vypočteme z hodnot z tabulky naměřených hodnot v příloze.

Tabulka 4- Naměřené hodnoty

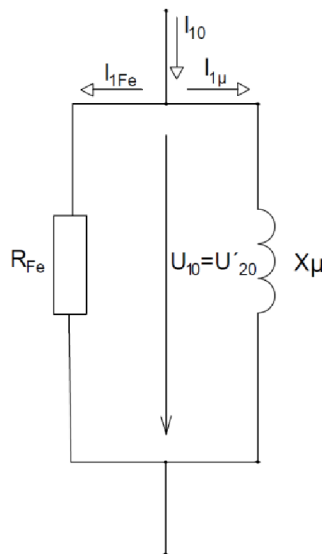
$U_2$	17 V
$I_2$	106,9 mA
$\varphi$	40°

$$U'_2 = 17V * p = 17V \cdot 245,5 = 4173,5V \quad 7.1$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{p} = \frac{106,9 \cdot 10^{-3}}{245,5} = 435,527 \mu A \quad 7.2$$

$$|Z_\mu| = \frac{U_{1p}}{I_{1p}} = \frac{4173,5}{435,537 \cdot 10^{-6}} = 9,583 M\Omega \quad 7.3$$

Protože příčná impedance je řádově větší než impedance podélná, budeme ji u výpočtu zanedbávat. Náhradní schéma se tedy zjednoduší následujícím způsobem.



Lze tedy uvažovat, že impedance příčné větve je tvořena pouze  $R_{Fe}$  a  $X_\mu$ . Za tohoto předpokladu platí následující vztahy.

$$\frac{1}{Z_\mu} = -\frac{1}{jX_\mu} + \frac{1}{R_{Fe}} \quad 7.4$$

$$\frac{1}{9,55 \cdot 10^6 40^\circ} = \frac{1}{R_{Fe}} - \frac{1}{jX_\mu} \quad 7.5$$

$$8,0214 \cdot 10^{-9} - j67,308 \cdot 10^{-9} = \frac{1}{R_{Fe}} - \frac{1}{jX_\mu} \quad 7.6$$

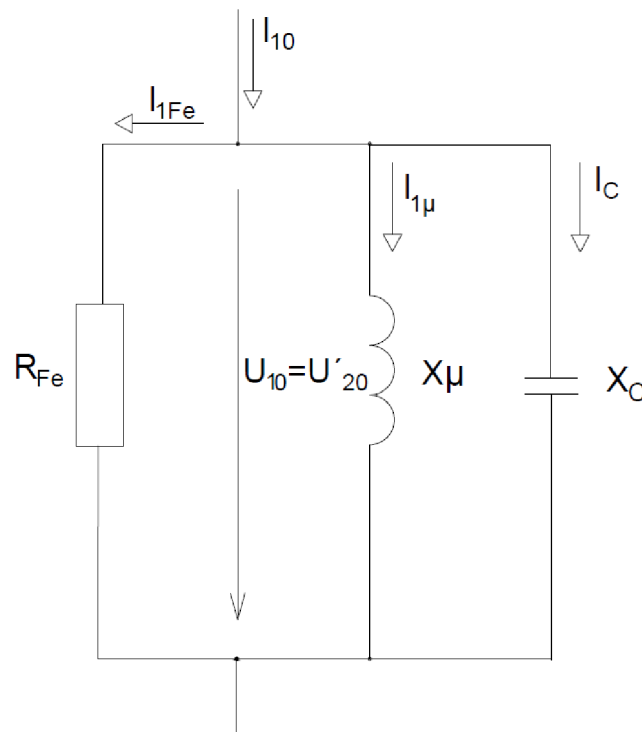
$$R_{Fe} = (80,214 * 10^{-9})^{-1} = 12,467 M\Omega \quad 7.7$$

$$X_{\mu 40} = (67,308 * 10^{-9})^{-1} = 14,857 M\Omega \quad 7.8$$

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu 40}}{2\pi * f} = \frac{14,857 * 10^6}{2 * \pi * 40} = 59,114 kH \quad 7.9$$

Vypočetli jsme tedy velikost  $R_{Fe}$  a  $L_{\mu}$  pro frekvenci 40 Hz pro případ, kdy neuvažujeme mezi vrstvou kapacitu vinutí.

## 7.2 Určení kapacity pomocí měření naprázdno



Při frekvenci 105 Hz je proud induktivního charakteru, který prochází přes indukčnost  $X_{L\mu}$  zcela vykompenzován kapacitou C. Fázový posun je v tomto případě  $0^\circ$ .

$$X_{L\mu} = X_c \quad \text{pro } f = 105 \text{ Hz} \quad 7.10$$

$$X_{L\mu} = 2\pi f L = 2 * \pi * 105 * 58,887 * 10^3 = 38,85 M\Omega \quad 7.11$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f * C} \quad 7.12$$

$$C = \frac{1}{2\pi f * X_c} = \frac{1}{2 * \pi * 105 * 38,85 * 10^6} = 39 pF \quad 7.13$$

Protože jsme ovšem vycházeli z hodnoty  $X_{L\mu}$ , která se vlivem kapacity bude měnit, ke správnému výsledku pomocí tohoto postupu bychom se dostali až po několikanásobné iteraci



tohoto výpočtu. Přesnější určení pro nás tedy bude pomocí využití vzájemné rezonance  $X_C$  a  $X'_{2L\sigma}$ .

### 7.2.1 Určení kapacity pomocí rezonance

Měřením jsme zjistili, že  $X'_{2L\sigma}$  rezonuje s  $X_C$  při frekvenci 2,2 kHz pro měřený transformátor TJC 7.0-G. Pomocí tohoto předpokladu, lze tedy přesně určit hledanou kapacitu. Určení kapacity a její rezonanční frekvence může dále sloužit k prevenci nežádoucích stavů v síti, ke které je transformátor připojen a eliminovat tak případné havárie.

Vztah platí pro frekvenci 2,2 kHz

$$X_C = X_{1L\sigma} \quad 7.14$$

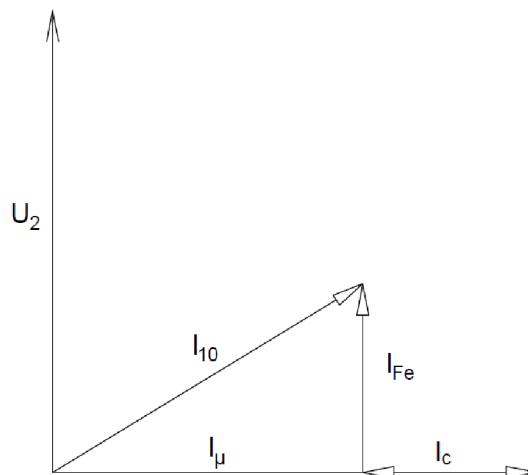
$$\frac{1}{2\pi f * C} = 2\pi f * L \quad 7.15$$

$$\frac{1}{C} = 4 * \pi^2 * f^2 * L \quad 7.16$$

$$\frac{1}{C} = 4 * \pi^2 * 2200^2 * 75,95 \quad 7.17$$

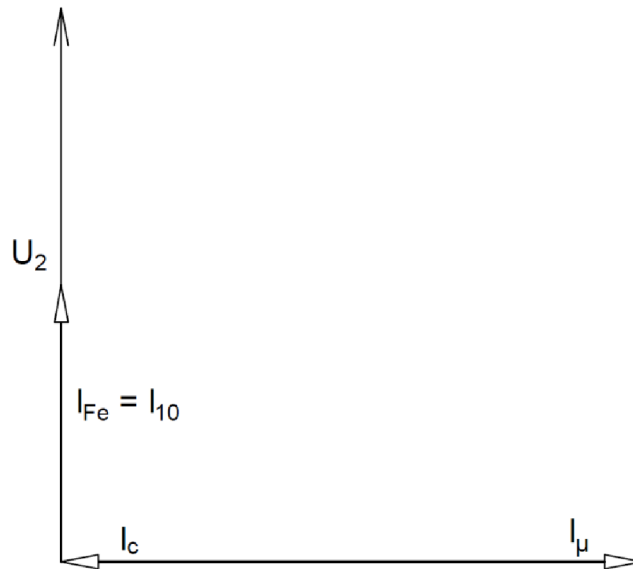
$$C = 68,9 \text{ pF} \quad 7.18$$

Určením mezivrstevové kapacity  $C$ , jsme tedy získali všechny hodnoty prvků náhradního schématu. Na následujících fázorových diagramech si ukážeme vliv frekvence na proud protékající transformátorem.



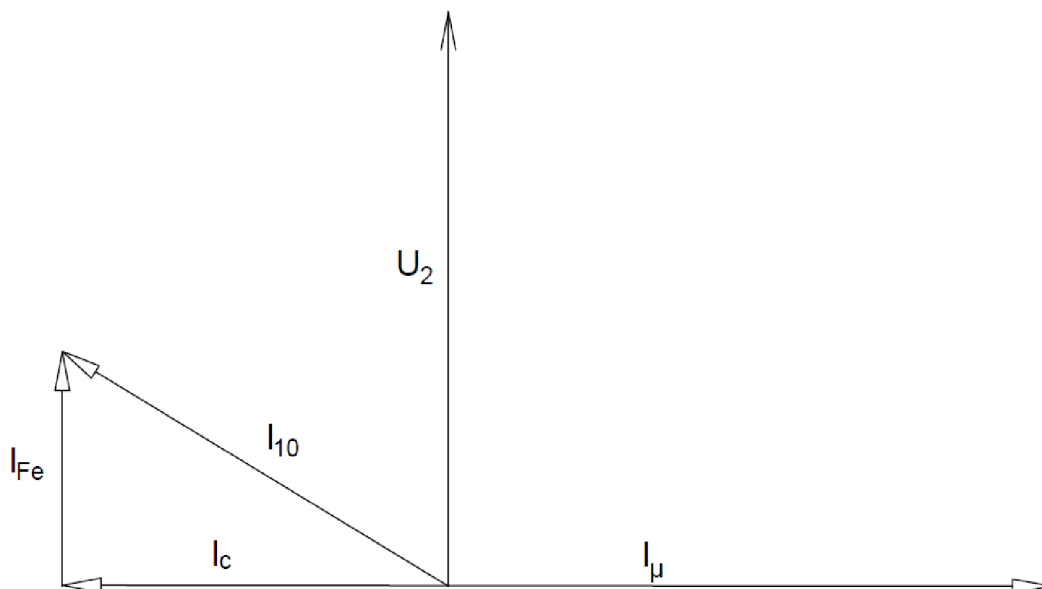
Obrázek 24 - Fázorový diagram pro 50 Hz

Uvedený fázorový diagram je obecný a nevychází z naměřených a vypočtených hodnot. Jeho hlavní úlohou je poukázat na vlastnosti kapacity v daném obvodu transformátoru. Se zvyšující se frekvencí se bude kapacita projevovat mnohem více.



Obrázek 25 - Fázorový diagram pro 120 Hz

Měřením jsme zjistili, že při frekvenci 120 Hz, je fázový posun  $U_2$  a  $I_{10}$  nulový. Dochází tedy k úplnému vykompenzování proudu  $I_{\mu}$  kapacitním proudem  $I_C$ . Proud protékající obvodem je tedy při dané frekvenci 120 Hz roven proudu  $I_{Fe}$ .



Obrázek 26 - Fázorový diagram pro 5000 Hz

Pro vyšší frekvence se již kapacita projeví a obvod, který původně byl induktivního charakteru, přechází do stavu kapacitního charakteru. Tento jev nastává, protože proud  $I_C$  protékající kapacitou  $C$  nabývá větší velikosti než proud  $I_{\mu}$  pro kmitočty větší než 120 Hz.

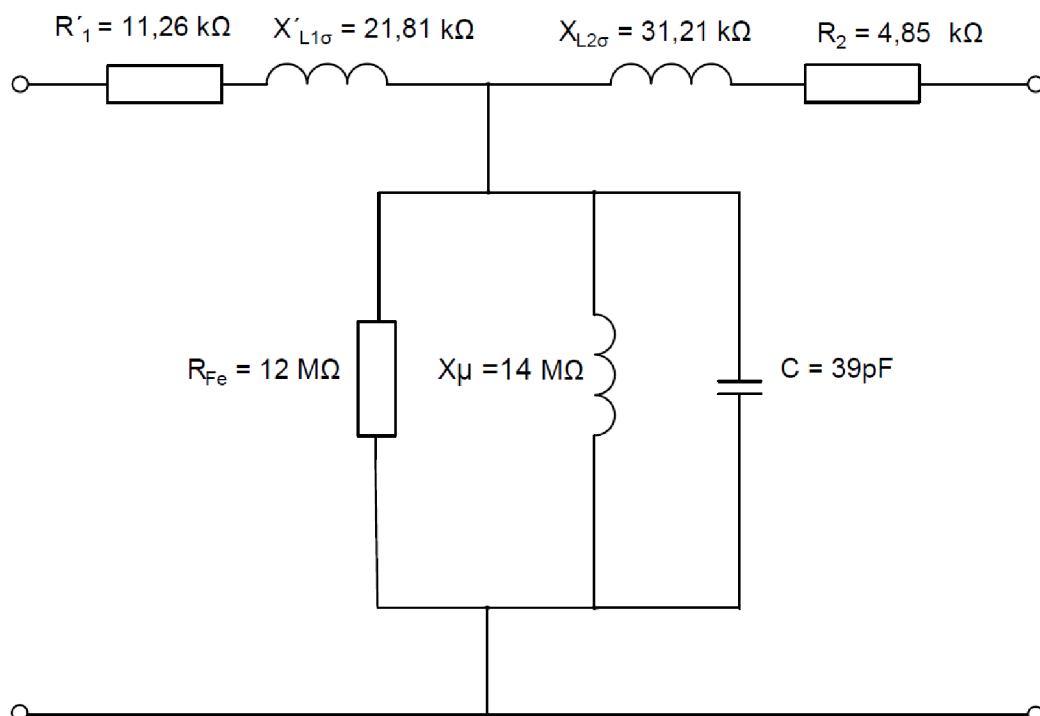
## 8 ZÁVĚR

Měření provedené na přístrojovém transformátoru TJC 7.0-G proběhlo ve spolupráci s firmou ABB s.r.o. Cílem této práce bylo sestavit náhradní schéma pro přístrojový transformátor napětí a vyhodnotit jednotlivé metody určení prvků obvodu. Největší prioritou byla přikládána metodám pro určení rozptylové reaktance, jejichž hodnota je potom dále využívána pro správné nastavení ochrany v rozváděči.

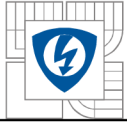
Nejpřesnější hodnoty rozptylových reaktancí byly získány s využitím napětí na meziobvodu da-n. Tato metoda však nemůže být použita pro přístrojové transformátory napětí, které meziobvod da-n nemají. V případě že se jedná o transformátor bez vinutí da-n, byla podle srovnání vybrána metoda rovnoměrného rozdělení rozptylové reaktance jako druhá nejpřesnější. Metoda pomocí odporového rozdělení je zcela nevyhovující, hodnoty vypočtené pomocí této metody zcela neodpovídají reálným hodnotám.

Ve vinutí transformátoru, kromě indukce figuruje i mezivrstevová kapacita. Celková mezivrstevová kapacita byla vypočtena pomocí rezonance s podélnou rozptylovou reaktancí a její hodnota je rovna 68,9 pF. Nebezpečí, které vzniká, pokud uvažujeme přítomnost mezivrstevové kapacity, je v tom, že při vlivu vyšších harmonických v obvodu může dojít k rezonanci mezivrstevové kapacity a podélné rozptylové reaktance, a tím pádem k možné havárii transformátoru. Případná havárie transformátoru by byla způsobena zvýšením napětí mezi závity a vrstvami vinutí.

Práci bylo splněno její zadání - určení parametrů náhradního schématu. Nejdůležitějším výsledkem je určení správné metody měření rozptylové reaktance pro primární a sekundární vinutí. Nad rámec zadání bylo dále zkoumáno chování mezizávitové kapacity, která má podle měření dopad na chování obvodu při změnách frekvence. Její určení tedy vede k lepšímu pochopení chování náhradního schématu transformátoru.

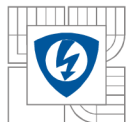


Obrázek 27- Náhradní schéma transformátoru TJC 7.0-G



## LITERATURA

- [1] KOPEČEK, Jan; DVORÁK, Miloš. *Přístrojové transformátory : měřicí a jisticí*. 1. vydání. Praha : Academia, 1966. 492 s.
- [2] DVORÁK, Miloš. ABB. *Přístrojové transformátory: Obecné informace*. 1VLC000500. Brno, 2004.
- [3] BRANČÍK, L. *Elektrotechnika 1*. Elektronické skriptum. Brno : FEKT VUT v Brně, 2003.
- [4] FAKTOR, Zdeněk. *Transformatory a civky*. vyd.1. Praha : BEN, 1999. 393 s. ISBN 80-86056-49-X, I.
- [5] CIGÁNEK, L., BAUER, M.: *Elektrické stroje a přístroje*, SNTL, Praha, 1955
- [6] FITZGERALD, A.E., KINGSLEY, Ch., KUSKO, A.: *Electric machinery*. McGraw Hill 1971
- [7] DOLEČEK, J.: *Moderní učebnice elektroniky 1.*, BEN, Praha, 2005.
- [8] KRÁL, J., VANĚK, J. *Elektromagnetické přístroje*. 1. vyd. Brno: VUT, 1984. Učební texty vysokých škol.



## PŘÍLOHY

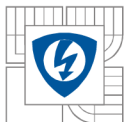
Tabulka 5 - Naměřené hodnoty pro rozdílné frekvence

$U_{\text{prim}}$ [V]	$I_{\text{sek}}$ [mA]	F [Hz]	$\Delta t$ [ms]	T - periody[ms]	$\varphi$ [°]
17,75	106,90	40	2,780	25,0000	-40
18,37	91,28	50	2,120	20,0000	-38
17,37	78,13	60	1,560	16,6667	-34
16,22	67,54	70	1,060	14,2857	-27
15,67	59,70	80	0,680	12,5000	-20
17,30	59,80	90	0,480	11,1111	-16
16,75	55,02	100	0,200	10,0000	-7
16,55	54,40	110	0,120	9,0909	5
17,44	57,20	120	0,320	8,3333	14
17,26	59,50	130	0,560	7,6923	26
16,70	62,52	140	0,760	7,1429	38
16,20	67,22	150	0,800	6,6667	43
16,05	72,58	160	0,850	6,2500	49
16,14	78,90	170	0,890	5,8824	54
16,45	85,33	180	0,910	5,5556	59
18,59	92,00	200	0,880	5,0000	63
18,97	121,70	250	0,776	4,0000	70
17,40	312,40	500	0,448	2,0000	81
16,46	552,00	750	0,302	1,3333	82
17,67	778,00	1000	0,228	1,0000	82
18,40	996,00	1180	0,192	0,8475	82
1,96	295,00	1700	0,168	0,5882	103
1,95	346,00	1760	0,166	0,5682	105
2,06	356,10	1800	0,163	0,5556	106
2,05	425,00	1850	0,159	0,5405	106
2,03	556,00	1920	0,159	0,5208	110
2,02	664,10	1960	0,159	0,5102	112
2,02	817,00	2000	0,159	0,5000	114
0,82	1044,00	2178	0,000	0,4591	0
2,04	1064,00	2040	0,163	0,4902	-120
1,92	1122,00	2320	0,085	0,4310	-71
1,95	950,00	2350	0,085	0,4255	-72
1,94	749,00	2400	0,088	0,4167	-76
1,94	593,00	2460	0,090	0,4065	-80
1,96	519,00	2500	0,090	0,4000	-81
1,99	392,00	2600	0,087	0,3846	-81
1,81	344,00	2700	0,082	0,3704	-80
1,84	288,00	2800	0,080	0,3571	-80
1,91	212,00	3000	0,073	0,3333	-79
1,96	131,00	3500	0,074	0,2857	-93
1,89	92,00	4000	0,063	0,2500	-90
1,95	61,00	4500	0,059	0,2222	-96
2,06	33,00	5000	0,052	0,2000	-94



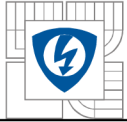
*Tabulka 6 - Naměřené hodnoty pro zapojení naprázdno*

$U_{\text{prim}}$ [V]	$U_{\text{sek}}$ [V]	F [Hz]
302,3	1,255	50
308,7	1,271	100
320,6	1,292	300
336,9	1,284	600
380,2	1,314	900
441,2	1,307	1200
677,3	1,334	1500
919,9	1,340	1800
1219	1,372	1900
1786	1,368	2000
3452	1,455	2100
3722	1,455	2110
3607	1,491	2260
1321	1,351	2400
506,2	1,334	2700
404,3	1,314	2800
248,3	1,353	3100
194,2	1,358	3400
138,7	1,399	3700
96,14	1,372	4000
59,12	1,333	4300
39,62	1,370	4600
22,38	1,367	4900
17,15	1,381	5000



*Tabulka 7- Naměřené hodnoty pro zapojení nakrátko*

F [Hz]	$U_k$ [V]	$I_k$ [mA]
50	164	666
100	252	661
150	354	660
220	500	660
270	624	660
330	740	660
390	872	660
470	1050	660
560	1290	660
680	1540	659
750	1700	661
820	1920	660
1000	2300	660
1100	2560	661
1200	2820	660
1350	3180	660
1480	3680	656
1500	3780	662

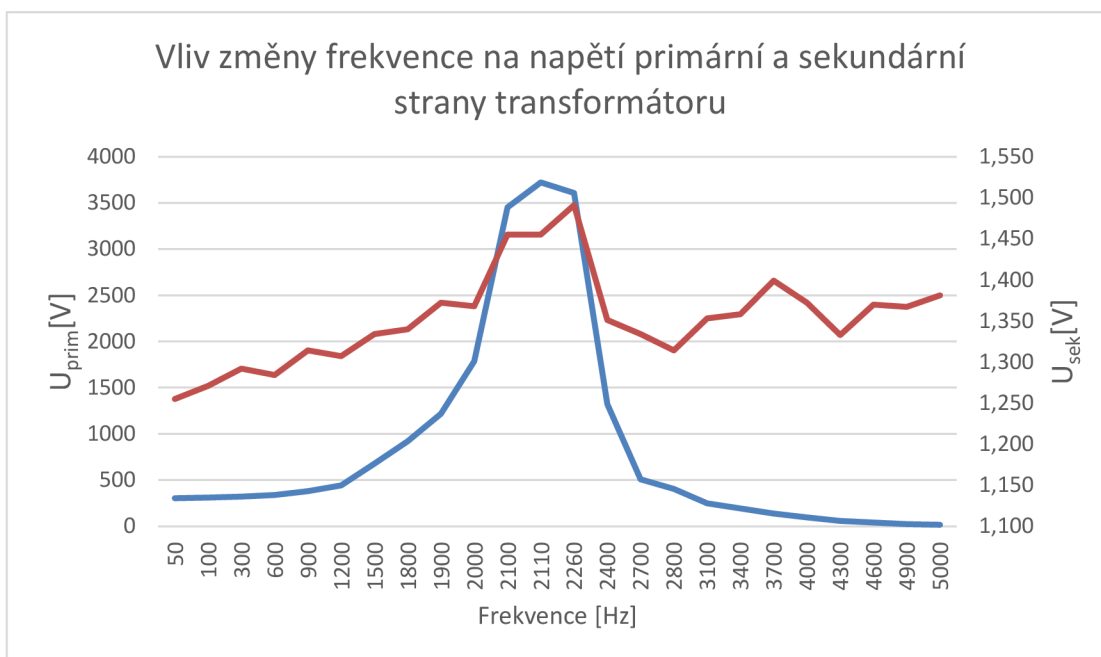


Tabulka 8 - Naměřené hodnoty převodu transformátoru

F[Hz]	fázové zpoždění[min]	$U_p$ [kV]	$U_s$ [V]	komentář
50		4,16	17,2	
130	0	4,36	60	Kompenzace
80		4,28	17,8	
100		4,32	17,8	
130		4,32	17,8	
180		4,40	18,2	
220		4,40	18,2	
250		4,44	18,4	
280		4,48	18,4	
320		4,56	18,6	
380		4,64	18,8	
420		4,68	19,2	
450		4,72	19,2	
500		4,84	20	
600		6,04	20,6	
750		6,68	22,6	
900		6,36	25,6	
1000		3,56	14,4	
1100		4,08	16,4	
1200		4,88	19,8	
1350		7,36	29,8	
1350		2,96	12	
1400		3,64	14,6	
1450		4,72	18,8	
1480		2,88	1,6	
1500		3,36	3,36	
1520		4,08	16,4	
1530		4,56	18	
1560		6,24	24,8	
1560		3,16	12,6	
1590		4,08	16,4	
1600		4,04	16	
1620		3,46	13,8	
1650		2,50	9,76	
1700		1,50	5,92	
1750		1,02	4,12	
1800		1,20	6,04	
1850		1,20	4,8	
1900		0,99	4	
2000		0,72	2,92	
2100		0,56	2,28	
2300		0,38	1,52	
2750		0,96	3,6	



3000		0,72	2,76	
3500		0,44	1,44	
4000		0,26	0,94	
4500		0,14	0,472	
5000		0,08	0,248	fázový rozdíl, 3,2 $\mu$ S



Obrázek 28- Graf závislosti frekvence na napětí

Tabulka 9 - Použité měřicí přístroje

Přístroj	Název	Informace
Multimetr	FLUKE 3845A	<a href="http://www.datasheetarchive.com/R/fluke+3845a-datasheet.html">http://www.datasheetarchive.com/R/fluke+3845a-datasheet.html</a>
Osciloskop	OWON Smart DS 6062	<a href="http://akizukidenshi.com/download/ds/owon/SDS6062.pdf">http://akizukidenshi.com/download/ds/owon/SDS6062.pdf</a>
Generátor	Tektronix AFG 3031B	<a href="http://www.testequipmentdepot.com/tektronix/pdf/afg3000_data.pdf">http://www.testequipmentdepot.com/tektronix/pdf/afg3000_data.pdf</a>
Sonda	Tektronix PG6015A	1000X 3.0pF 100M $\Omega$