

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Přídavné ztráty v nádobě transformátoru v nesouměrném
režimu zatížení**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan KOUBA**
Osobní číslo: **E10B0054P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Přídavné ztráty v nádobě transformátoru v nesouměrném režimu zatížení**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


1. Popište chování transformátoru v nesymetrickém režimu zatížení.
2. Popište princip vzniku ztrát v nádobě transformátoru.
3. Proveďte měření ztrát v nádobě transformátoru v různých režimech nesymetrických zatížení.
4. Zhodnoťte výstupy měření.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. BARTOŠ, V.: Elektrické stroje.
2. PETROV, G. N.: Elektrické stroje 1 - Transformátory.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Karel Hruška, Ph.D.
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2012
Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2013


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce pojednává o vzniku a měření přídavných ztrát v nádobě transformátoru v různých zapojeních. Nejdříve v symetrickém zapojení do trojúhelníku, poté v nesymetrickém zapojení s odpojenou jednou či dvěma zátěžemi, poslední měření proběhlo naprázdno. V této práci jsou obsaženy základní informace o transformátoru, jeho principu a popis různých druhů transformátorů. Dále se v této práci popisuje nesymetrické zapojení transformátoru se základními výpočty. Celá třetí kapitola je určena ztrátám. Konec této práce pojednává o průběhu měření a jeho výsledcích.

Klíčová slova

Transformátor, nesymetrické zatížení, přídavné ztráty, nádrž transformátoru, rozptylové ztráty, vířivé proudy, hloubka vniku.

Abstrakt

My thesis deals with a creation and measurements of additional losses in the transformer tank in various connections. The first one was in the symmetrical delta connection, the second one was in the asymmetrical connection in which were one or two loads disconnected and the last measurement was done without any connection (non-load connection). My first aim was to introduce the basic information about the transformer, his principles and also the description of various types of transformers. My second aim was to describe the asymmetrical connections of the transformer with its basic calculations. The third part includes losses of the transformer and the last part of my thesis discusses the progress of the measurement and its results.

Key words

Transformer, asymmetrical load, additional losses, transformer tank, stray losses, eddy current, skin depth.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
Podpis

V Plzni dne 4.6.2013

Jan Kouba

Poděkování

Touto formou bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Karlu Hruškovi, Ph.D. za jeho ochotu, cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení během zpracování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval celé své rodině, za podporu během celého studia.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 PRINCIP ČINNOSTI TRANSFORMÁTORU	11
1.1 MAGNETICKÝ OBVOD TRANSFORMÁTORU	12
1.1.1 Elektrotechnické plechy pro transformátory	13
1.1.2 Druhy magnetických obvodů transformátoru	13
1.1.3 Stavba magnetického obvodu	14
1.2 VINUTÍ TRANSFORMÁTORU	15
1.2.1 Konstrukce vinutí	16
2 NESYMETRICKÉ ZATÍŽENÍ TRANSFORMÁTORU	18
2.1 NESYMETRICKÉ ZATÍŽENÍ TRANSFORMÁTORŮ S NEVYVEDENÝM NULOVÝM BODEM	19
2.2 NESYMETRICKÉ ZATÍŽENÍ TRANSFORMÁTORŮ S VYVEDENÝM NULOVÝM BODEM	23
2.3 CHOD TRANSFORMÁTORU S ODPOJENOU FÁZÍ	26
2.4 JEDNOSMĚRNÁ MAGNETIZACE	26
3 ZTRÁTY TRANSFORMÁTORU	28
3.1 ZTRÁTY NAPRÁZDNO	28
3.2 ZTRÁTY NAKRÁTKO	29
3.3 ZTRÁTY PŘÍDAVNÉ	29
3.3.1 Rozptylové ztráty v nádrži	29
3.3.2 Ztráty vířivými proudy pro různé povrchové buzení	31
3.3.3 Vliv materiálu na rozptylové ztráty	33
4 METODY MĚŘENÍ VÝKONŮ V TROJFÁZOVÉ SÍTI	36
4.1 GÖRGESOVO ZAPOJENÍ	36
4.2 ARONOVO ZAPOJENÍ	37
4.3 MĚŘENÍ TŘEMI WATTMETRY	37
5 VLASTNÍ MĚŘENÍ	39
5.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ	39
5.2 POSTUP MĚŘENÍ	39
5.3 NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY	40
5.3.1 Tabulky naměřených a vypočtených hodnot pro měření bez nádoby	40
5.3.2 Tabulky naměřených a vypočtených hodnot pro měření s nádobou	41
5.4 POUŽITÉ VÝPOČTY	41
5.5 GRAFY	42
5.6 POUŽITÉ PŘÍSTROJE	43
ZÁVĚR	45
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	46
PŘÍLOHY	1
PŘÍLOHA A – TRANSFORMÁTOR BEZ A S NÁDOBOU	1
PŘÍLOHA B – ZÁTĚŽ A ZAPOJENÍ MĚŘENÍ	2

Seznam symbolů a zkratk

$1f, 3f$	Počet fází
B	Magnetická indukce [T]
E_a, E_b, E_c	Efektivní hodnoty elektromotorické síly [V]
f	frekvence [Hz]
H	Intenzita magnetického pole [A/m]
I_a, I_b, I_c	Síťové proudy [A]
I_{af}, I_{bf}, I_{cf}	Fázové proudy [A]
$L1, L2, L3$ (U, V, W)	Fázové vodiče napájecí soustavy
m	Počet fází
N	Střední pracovní vodič napájecí soustavy
p_{12}	Převod transformátoru
U_a, U_b, U_c	Fázové napětí [V]
U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}	Síťové napětí [V]
Z_{00}	Celková nulová impedance [Ω]
ΔP_{FeH}	Ztráty hysterezní [J]
ΔP_{FeV}	Ztráty vířivými proudy [J]
ΔP_j	Joulovy ztráty [J]
γ	Konduktivita materiálu [S/m]
δ	Hloubka vniku [m, (mm)]
$\Phi_{1\sigma}$	Rozptylový magnetický tok [Wb]
Φ_{1h}	Hlavní magnetický tok [Wb]
Ψ	Magnetický tok celého vinutí [Wb]
μ_r	Permeabilita materiálu [H/m]

Úvod

Úvodem bych rád zdůraznil, že reálný transformátor nepracuje bezztrátově. Ztráty jsou důležitým aspektem každého návrhu transformátoru. Ztrátami v transformátoru se zabývá i tato bakalářská práce.

Předkládaná bakalářská práce je rozdělena do pěti částí, kde první část popisuje princip činnosti transformátoru, základní informace o magnetickém obvodu transformátoru, jako rozdělení elektrotechnických plechů či stavba a druhy magnetického obvodu. V první části se také píše o vinutí transformátoru a jeho konstrukci. Druhá část se zabývá nesymetrickou zátěží transformátoru s vyvedeným a nevyvedeným nulovým bodem, chodem transformátoru s odpojenou fází a jednosměrnou magnetizací. Přídavné ztráty transformátoru spolu s popisem rozptylových ztrát v nádobě, ztrát vířivými proudy pro různé povrchové buzení, vliv materiálu na rozptylové ztráty jsou spolu s popisem ztrát naprázdno a nakrátko obsahem třetí kapitoly. Čtvrtá kapitola je věnována rozdělení základních metod pro měření třífázové soustavy. Samotnému měření, schématu zapojení použitému při měření přídavných ztrát či tabulce vypočtených hodnot se zabývá poslední kapitola.

Cílem této bakalářské práce je zjištění velikosti přídavných ztrát v transformátoru při nesouměrném zatížení a vliv nádoby transformátoru na tyto ztráty.

Během psaní mé bakalářské práce jsem použil informace získané studiem na Západočeské univerzitě v Plzni, dále byly použity informace získané z knih, článků a internetových publikací vyjmenovaných v bibliografické části. V neposlední části tato bakalářská práce obsahuje informace získané při samotném měření.

1 Princip činnosti transformátoru

Transformátor je střídavý, netočivý, elektromagnetický stroj. Transformátor transformuje elektrickou energii (elektrický proud a elektrické napětí). Forma energie na vstupu a výstupu transformátoru je stejná, což ho odlišuje od většiny elektrických strojů, kde se elektrická energie mění na mechanickou či naopak.[1]

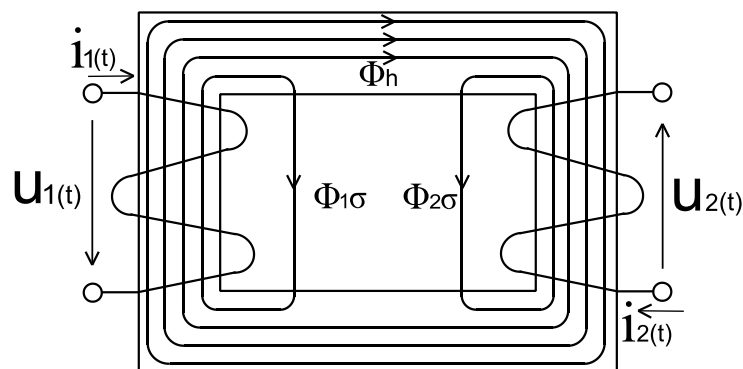
Jelikož transformátor nemá rotační části, patří k jednodušším elektrickým strojům, kde přenos elektrické energie má velikou účinnost. V návrhu a při výrobě transformátoru je možné ovlivnit veliké množství parametrů (velikost, výkon atd.). Výkony se pohybují od necelých VA do stovek MVA. Transformátory s malými výkony jsou používány převážně pro sdělovací obvody nebo pro napájení polovodičových zařízení. Naopak transformátory s velkými výkony jsou používány spíše pro přenos elektrické energie v energetice.[1]

Princip činnosti

Princip činnosti transformátoru je založen na zákonu o elektromagnetické indukci. Jedno vinutí (primární vinutí) vybudí magnetický tok, který indukuje napětí na vinutí druhém (sekundární vinutí). Magnetický tok se rozděluje na dvě složky a to hlavní Φ_{1h} a rozptylovou $\Phi_{1\sigma}$. Rovnice pro celkový magnetický tok primárního vinutí zní takto [1]:

$$\Phi_1(t) = \Phi_{1h}(t) + \Phi_{1\sigma}(t) \quad (1.1)$$

Zde magnetický obvod vede hlavní magnetický tok z primárního vinutí na sekundární viz obrázek (1.1). Energie potřebná k vytvoření rozptylové složky se nepřevádí na sekundární vinutí. Tato složka je při porovnání s hlavní složkou magnetického toku výrazně menší.[1]



Obr. 1.1 Princip transformátoru naprázdno [1]

Po přivedení střídavého napětí na primární vinutí se vytvoří střídavý magnetický tok, který je popsán touto rovnicí [1]:

$$\Phi_h(t) = \Phi_{hmax} \sin(\omega t + \alpha) \quad (1.2)$$

Střídavé napětí na sekundárním vinutí je vybuzeo časovou změnou spřaženého magnetického toku. Toto napětí je možné nazvat indukované napětí U_i , také je možné ho vyjádřit rovnicí [1]:

$$U_i = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.3)$$

Poměr závitů primární a sekundární cívky určuje velikost indukovaného napětí. Ze vztahu (1.3). Pokud ale primárním vinutím prochází stejnosměrný proud, na sekundárním vinutí se napětí nenaindukuje. Transformátor tedy nefunguje na stejnosměrný proud.[1]

1.1 Magnetický obvod transformátoru

Magnetický obvod je jednou z nejdůležitějších činných částí transformátoru. Magnetický obvod se skládá z plechů železného jádra. Magnetický obvod nese magnetický tok buzený vinutím. Energie je převáděna z jednoho elektrického obvodu do druhého za pomoci magnetického pole vedeného jádrem. Železné jádro zajišťuje magnetickému toku cestu o malé reluktanci, čímž se sníží magnetizační proud. Většina z magnetického toku je obsažena v jádře, zbytek se uzavírá v konstrukčních částech transformátoru.[8,2]

Vzhledem k probíhajícímu výzkumu a úsilí o rozvoj výrobců ocelí a výrobců transformátorů jsou aplikovány materiály s čím dál tím lepšími vlastnostmi. Dříve se pro výrobu jader transformátorů používaly oceli s velkými vlastními ztrátami (vzhledem k dnešním měřítkům). Později se zjistilo, že přidáním křemíku na 4 až 5 % se zvýší účinnost transformátoru, vzhledem k výraznému snížení ztrát vířivými proudy. Tato výhoda je na úkor mechanických vlastností oceli a zvýšení permeability. Hysterezní ztráty budou také menší z důvodu užší hysterezní smyčky. Přídavek křemíku pomáhá snížit účinky stárnutí.[2,3,6]

1.1.1 Elektrotechnické plechy pro transformátory

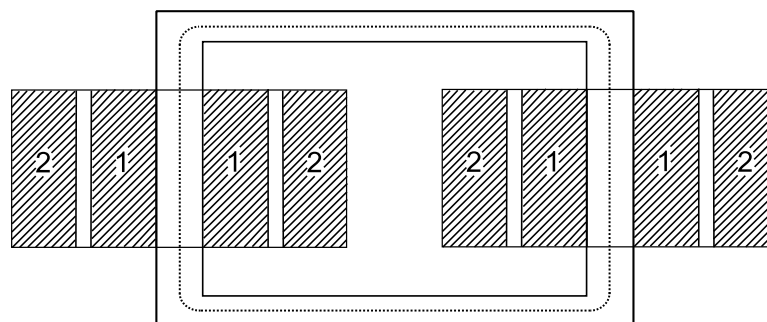
V současné době se používají plechy o tloušťce 0,23 až 0,35 mm pro výkonové transformátory. Maximální tloušťka plechu se používá u malých transformátorů a může být až 0,50 mm. Plechy se od sebe musí izolovat, používá se anorganická povrchová úprava. Obecně sklo a fosfátová vrstva s tloušťkou 0,002 až 0,003 mm, lakování a u starších olejových transformátorů se používala papírová izolace. Izolace musí odolávat vířivému napětí někdy i několik voltů. Také záleží na zpracování transformátorových plechů. Při válcování za tepla (označení Et) jsou krystalky uspořádané náhodně (izotropní), vlastnosti tohoto plechu nezáleží na směru válcování. Válcování za studena s neorientovanou strukturou (Ei). Také izotropní s obsahem křemíku až 2 %. Plechy válcované za studena s orientovanou strukturou (Eo) mají směr snadné magnetizace ve směru válcování (Gossova textura – hrany krystalu rovnoběžné se směrem válcování).[3,7]

1.1.2 Druhy magnetických obvodů transformátoru

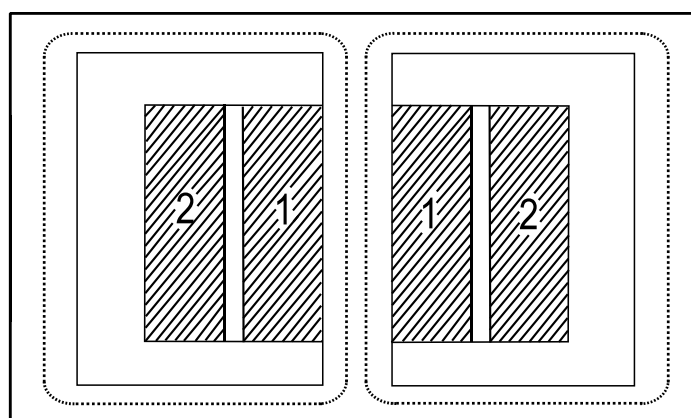
Existují dva základní typy magnetických obvodů transformátoru a to jádrový (Obr. 1.2) a plášťový (Obr. 1.3).[2,1,3]

Jádrový transformátor má dvě vinutí na dvou jádrech tak, že vinutí s menším napětím musí být blíže k jádru. Spojkami i jádru prochází stejný (celkový) magnetický tok, z tohoto důvodu musí být průřez jádra i spojky stejný. Jádrový transformátor je konstrukčně jednodušší a lépe se chladí.[2,1,3]

Vinutí plášťového transformátoru je navinuto pouze na vnitřním jádru. Pomocná jádra mohou mít poloviční průřez z důvodu, že jimi teče pouze poloviční magnetický tok než u hlavních jader. Hlavní výhoda plášťových transformátorů je, že mají lepší symetrii u třífázových transformátorů. Další výhody při stejném tvaru cívek jsou menší rozptylové toky, tím se i zmenší ztráty. Také konstrukční výška plášťového transformátoru je menší než u jádrového transformátoru. Plášťový transformátor je tvrdší, což znamená, že kolísání napětí se změnou zátěže je menší.[2,1,3]



Obr. 1.2 Jádrové provedení transformátoru [2,1,3]

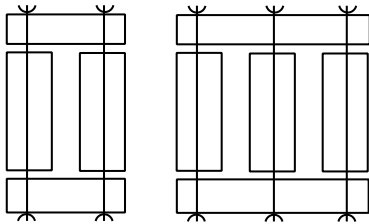


Obr. 1.3 Plášťové provedení transformátoru [2,1,3]

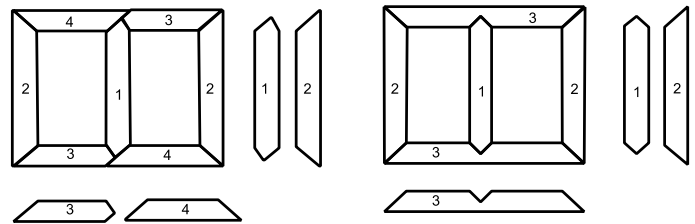
1.1.3 Stavba magnetického obvodu

Skládání natupo se provede složením každého jádra i spojky zvlášť. Transformátor drží pohromadě díky stahovacím čepům. Výhodou je jednoduchá montáž a demontáž. Nevýhodou je větší reluktance (magnetický odpor). V praxi se moc nepoužívá.[10,3]

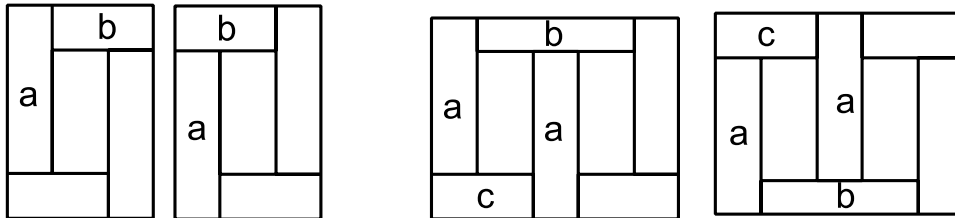
Skládání přeplátováním se provádí střídáním vrstev, buď střídání sudé a liché vrstvy pod úhlem 90° nebo se stříhem pod úhlem 45° . Skládání vrstev pod úhlem 90° je poměrně jednoduché z hlediska výroby, ale ztráta u rohových spojů a orientovaných plechů je větší z důvodu, že směry magnetizace jsou na sebe kolmé. Pokud jsou použity orientované plechy, je nutné je střídat viz obrázek (1.6). Metoda postupného překrývání je používána mnoha výrobci kvůli své účinnosti. Skládá se ze skupin po 5 až 7 plechách. Ve srovnání s konvenční metodou skládání plechů je výrobní proces složitější, ale vynahrazuje to výrazným zmenšením reluktance.[10,3,17]



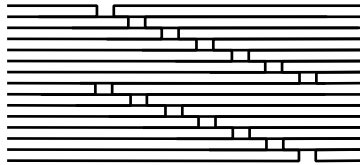
Obr. 1.4 Skládání natupo [12]



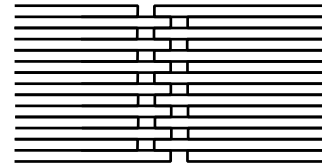
Obr. 1.5 Skládání překlátováním pod úhlem 45° [12]



Obr. 1.6 Skládání překlátováním 1F a 3F transformátoru pod úhlem 90° [12]



Obr. 1.7 Metoda postupného překrývání [3,17]



Obr. 1.8 Konvenční metoda překrývání [3,17]

1.2 Vinutí transformátoru

Jedním z dalších základních částí transformátoru je jeho vinutí. Tato část transformátoru musí také vyhovovat spoustě důležitých požadavků například [2,3,9]:

Mechanická pevnost. Elektrický obvod musí být schopen vydržet velké mechanické namáhání z důvodu možného zkratového proudu, který může způsobit velké elektromagnetické síly. Také při výrobě transformátoru je vedení mechanicky namáhané.

Elektrická pevnost. Izolace musí vydržet dlouhodobé i krátkodobé elektrické namáhání. Mezi krátkodobá patří rázová přepětí, také izolační systém vinutí musí být odolný oproti částečným výbojům. Nebezpečný je také účinek dlouhodobého působení střídavého elektrického pole.

Technologická proveditelnost. Technologická proveditelnost klade důraz na jednoduchost a na cenu.

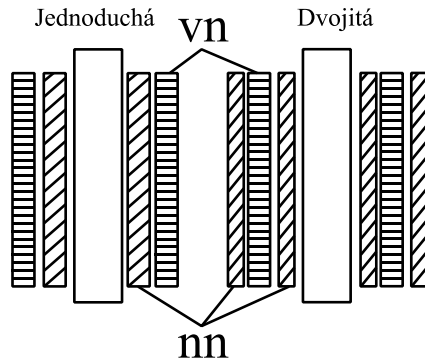
Odolnost proti tepelnému namáhání. Konstrukce transformátoru musí zajišťovat tepelný odvod dostatečný, pro danou teplotní třídu izolace.

Ekonomika provozu. Je nutné zvážit, jaké opatření regulace ztrát se při výrobě z ekonomického hlediska vyplatí.

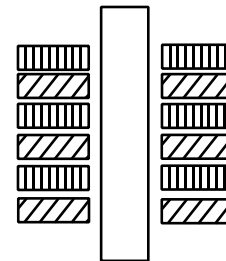
1.2.1 Konstrukce vinutí

O druhu konstrukce vinutí rozhodují dvě hlavní veličiny, jmenovitý proud a jmenovité napětí transformátoru. Průřezy vodičů se používají kruhové či čtyřhranné, kde velikost průřezu nebo počet paralelních větví určuje právě jmenovitý proud transformátoru. K jmenovitému napětí transformátoru přihlížíme při volbě konstrukce izolace mezi závity, cívkami nebo mezi částmi vinutí a konstrukčními prvky transformátoru.[2,3]

Podle umístění vinutí na jádrech transformátoru a podle vzájemné polohy vinutí s různou velikostí napětí se rozlišují vinutí na sousé a prostřídáné viz obrázky (1.9) a (1.10).[2,3]



Obr. 1.9 Souosé vinutí [2,12]

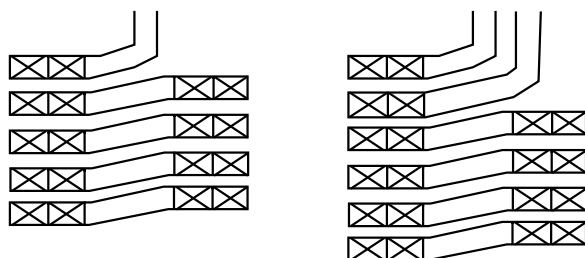


Obr. 1.10 Prostřídáné vinutí [2,12]

Souosá vinutí se dají dále rozdělit na jednoduchá a dvojitá. Jednoduché sousé vinutí se navíjí na jádro sousé, kde blíže k jádru se většinou umísťuje vinutí s nižším napětím. Z důvodu slabší potřebné izolace. Vně neboli dále od jádra se umísťuje vinutí s vyšším napětím. U dvojitého sousého vinutí je jediný rozdíl, vinutí s nižším napětím je rozděleno na dvě části, mezi které je vloženo vinutí s vyšším napětím, jak je vidět na obrázku (1.9). Toto provedení se vyznačují menším rozptylem, ale nároky na izolaci jsou větší a také výroba takového transformátoru je složitější.[2,3,16]

Prostřídání vinutí se skládá ve směru společné osy. Střídají se části vstupního vinutí s částmi výstupního vinutí. Celkové vinutí je rozděleno do symetrických skupin, kde každá skupina má vinutí s vyšším napětím mezi vinutími s nižším napětím. Výhodou tohoto provedení je menší rozptyl, ale na úkor složitosti izolace z důvodu velkých mezer mezi cívkami.[2,3]

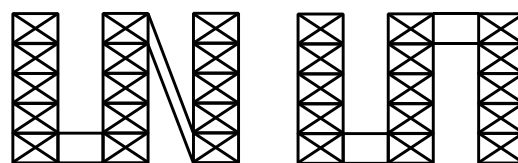
Při použití paralelních pásů je možné tyto pásy navíjet v jednochodé, dvouchodé nebo vícechodé šroubovice, jak je ukázáno na obrázku (1.11). Jelikož se požaduje mít proud v paralelních vodičích rozložený rovnoměrně, je nutné polohu vodičů střídat. Transpozice vodičů musí probíhat tak, aby se navzájem vystřídalily všechny vodiče. Na obrázku (1.12) jsou vidět základní typy střídání vodičů.[2,3,9]



Jednochodá

Dvouchodá

Obr. 1.11 Jedno a dvouchodé šroubovice [2]



Obr. 1.12 Základní typy střídání vodičů [2]

2 Nesymetrické zatížení transformátoru

Zatížení transformátoru není vždy mezi jednotlivé fáze rovnoměrně rozloženo a také napětí daných fází nejsou stejná. Nesymetrické zatížení se projevuje, při spojení trojfázové sítě s transformátorem, kde zátěž trojfázové sítě není rozdělena do všech tří fází stejně, je tedy rozdělena nesouměrně. Jelikož dnes jsou napájeny výkonové transformátory téměř výhradně symetrickým napětím, nesymetrické zatížení může nastat především zapojením velké zátěže do jedné fáze obvodu (např. elektrická trakce, obloukové pece atd.). Při provozu nesouměrně zatíženého transformátoru mohou vzniknout jevy, které se při symetrické zátěži neobjevují.[2,14]

Velmi důležitý je výpočet proudů a napětí transformátoru při nesymetrickém zatížení, neboť nepříznivý vliv na spotřebitele elektrické energie má především nesouměrnost síťových a fázových napětí. Zvýšením napětí nad jmenovitou hodnotu můžeme způsobit například rychlé přepálení žárovek nebo snížením napětí u jednotlivých fází můžeme snížit světelný výkon světelných zařízení. Také výkon trojfázových motorů se sníží s nesouměrným napětím.[2]

Je možné předpokládat, že soustava vstupních síťových napětí je dána jako U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} , které vždy podléhají rovnici (2.1) a soustava výstupních proudů I_a , I_b a I_c , které ve čtyřvodičové soustavě podléhá rovnici (2.2). Pokud není vyveden nulový vodič a tedy je soustava třívodičová, platí zde vztah (2.3).[2]

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CA} = 0 \quad (2.1)$$

$$I_a + I_b + I_c = I_d \quad (2.2)$$

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (2.3)$$

Dále by se pro řešení nesymetrického zatížení transformátoru měly učit fázové výstupní proudy I_{af} , I_{bf} a I_{cf} , pokud nejsou shodné s proudy síťovými. Fázové proudy vstupního vinutí I_{Af} , I_{Bf} a I_{Cf} , kde označení síťových hodnot je I_A , I_B a I_C . Výstupní síťová napětí U_{ab} , U_{bc} a U_{ca} , výstupní fázová napětí U_a , U_b a U_c a fázová vstupní napětí U_A , U_B a U_C . [2]

Pro zjednodušení výpočtů je možné předpokládat, že je velice malý magnetizační proud a převod transformátoru $p_{12} = 1$. [2]

Nejlépe se řeší nesouměrná zátěž transformátoru za pomoci metody souměrných složek. Jelikož sousledná i zpětná impedance vinutí transformátoru je stejná, je možné metodu souměrných složek pro transformátory zjednodušit. Z tohoto důvodu u výpočtů bude stačit pouze proud netočivé soustavy. [2]

2.1 Nesymetrické zatížení transformátorů s nevyvedeným nulovým bodem

Pokud nemají výstupní fázové a síťové proudy nulovou složku, platí následující rovnice (2.4) a rovnice (2.3). [2]

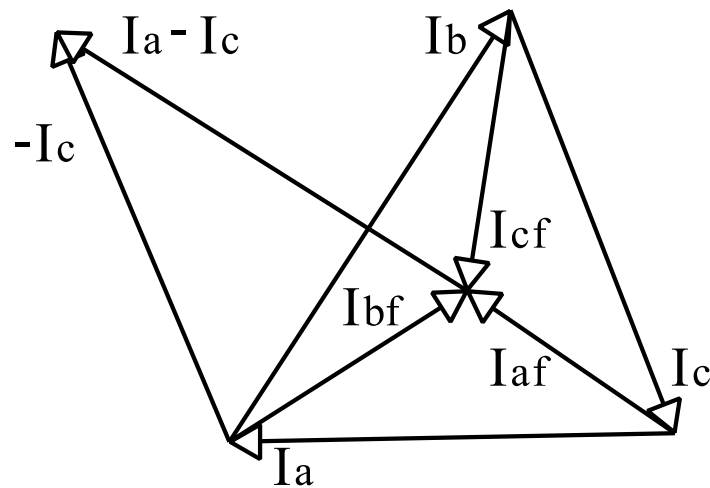
$$I_{af} + I_{bf} + I_{cf} = 0 \quad (2.4)$$

Jestliže je výstup z transformátoru zapojen do hvězdy, proudy síťové a fázové se sobě rovnají. Při zapojení výstupu transformátoru do trojúhelníku platí následující vzorce [2]:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{af} - I_{bf} , \\ I_b &= I_{bf} - I_{cf} , \\ I_c &= I_{cf} - I_{af} , \end{aligned} \quad (2.5)$$

Řešením rovnic (2.4) a (2.5) dostáváme [2]:

$$\begin{aligned} I_{af} &= \frac{1}{3} (I_a - I_c) , \\ I_{bf} &= \frac{1}{3} (I_b - I_a) , \\ I_{cf} &= \frac{1}{3} (I_c - I_b) , \end{aligned} \quad (2.6)$$



Obr. 2.1 Fázorový diagram proudů v 3F soustavě bez nulové složky proudu [2]

Podle rovnic (2.3), (2.4), (2.5) a (2.6) lze nakreslit fázorový diagram síťových a fázových proudů viz obrázek (2.1). Těžiště trojúhelníku fázorů síťových proudů je totožné se středem fázorů fázových proudů, při zapojení vinutí do trojúhelníku vyplývá z obrázku (2.1) a rovnice (2.6).[2]

Z rovnosti výstupních a vstupních magnetomotorických sil se určí vstupní fázové proudy [2]:

$$\begin{aligned} I_{Af} &= -I_{af}, \\ I_{Bf} &= -I_{bf}, \\ I_{Cf} &= -I_{cf}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

respektive

$$I_{Af} + I_{Bf} + I_{Cf} = 0 \quad (2.8)$$

Fázové proudy jsou rovny síťovým, pokud je vstupní vinutí transformátoru spojeno do hvězdy. Pro vstupní vinutí zapojené do trojúhelníku platí následující rovnice [2]:

$$\begin{aligned} I_A &= I_{Af} - I_{Bf}, \\ I_B &= I_{Bf} - I_{Cf}, \\ I_C &= I_{Cf} - I_{Af}, \end{aligned} \quad (2.9)$$

Řešením rovnic (2.8) a (2.9) se získá [2]:

$$\begin{aligned} I_{Af} &= \frac{1}{3} (I_A - I_C), \\ I_{Bf} &= \frac{1}{3} (I_B - I_A), \\ I_{Cf} &= \frac{1}{3} (I_C - I_B), \end{aligned} \quad (2.10)$$

Z rovnic (2.10) vyplývá, že bez ohledu na to, je-li výstupní vinutí zapojeno do hvězdy či trojúhelníku, při spojení vstupních vinutí do trojúhelníku střed, fázorů fázových vstupních proudů je v těžišti trojúhelníku fázorů síťových proudů. Tyto vztahy neplatí pouze pro proudy, ale i pro fázové i síťové vstupní a výstupní napětí transformátoru. Za předpokladu, že v každé fázi jsou magnetické toky v rovnováze, jsou výstupní i vstupní fázová napětí dána vztahy [2]:

$$\begin{aligned} U_A - I_{Af} Z_k &= -U_a, \\ U_B - I_{Bf} Z_k &= -U_b, \\ U_C - I_{Cf} Z_k &= -U_c, \end{aligned} \quad (2.11)$$

Pro vstupní vinutí zapojené do trojúhelníku, nehledě na tom, je-li výstupní vinutí zapojeno do trojúhelníku či do hvězdy je dle rovnic (2.8) a (2.11) součet fázových napětí nulový.[2]

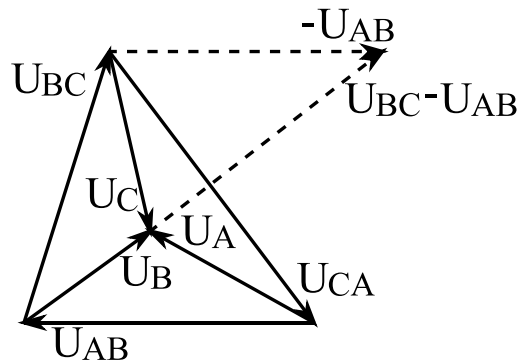
$$U_A + U_B + U_C = 0 \quad (2.12)$$

$$U_a + U_b + U_c = 0 \quad (2.13)$$

Při spojení vinutí do hvězdy jsou rovnice pro popsání vztahu mezi fázovými a síťovými napětími (2.14) a (2.15). Za předpokladu, že vinutí vyššího napětí je spojeno do hvězdy, což je běžné. Z rovnic (2.14) a rovnice (2.12) se získá fázová napětí (2.15).[2]

$$\begin{aligned}
 U_{AB} &= U_A - U_B, \\
 U_{BC} &= U_B - U_C, \\
 U_{CA} &= U_C - U_A,
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

$$\begin{aligned}
 U_A &= \frac{1}{3} (U_{AB} - U_{CA}), \\
 U_B &= \frac{1}{3} (U_{BC} - U_{AB}), \\
 U_C &= \frac{1}{3} (U_{CA} - U_{BC}),
 \end{aligned} \tag{2.15}$$



Obr. 2.2 Fázorový diagram napětí v 3F soustavě bez nulové složky proudu [2]

Na obrázku (2.2) je vidět, že je-li jedno vinutí zapojené do hvězdy, je těžiště trojúhelníku fázorů síťových napětí totožné se středem fázorů fázových napětí druhého vinutí, které je zapojené do trojúhelníku.[2]

Dále by se měly vysvětlit vztahy mezi síťovými a fázovými napětími u zapojení obou vinutí do hvězdy. Za předpokladu, že na vstupním vinutí je přivedeno větší napětí, platí následující rovnice, kde značeními E_a , E_b a E_c jsou myšleny efektivní hodnoty elektromotorické síly.[2]

$$\begin{aligned}
 U_A - I_A Z_1 &= -E_A, \\
 U_B - I_B Z_1 &= -E_B, \\
 U_C - I_C Z_1 &= -E_C,
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Zapojení obou vinutí transformátoru do hvězdy se používá pouze u transformátoru se třemi jádry, u kterých je součet magnetických toků všech jader téměř roven nule, tím se i součet všech efektivních hodnot elektromotorické síly rovná téměř nule. Z tohoto důvodu pro spojení obou vinutí do hvězdy také platí vzorce (2.12), (2.13) a (2.15).[2]

Tedy v zapojení hvězda – hvězda, hvězda – trojúhelník, trojúhelník - hvězda, trojúhelník – trojúhelník, respektive nejsou-li ani v jednom vinutí transformátoru netočivé složky, při nesymetrickém zapojení je možné každou fázi posuzovat samostatně (jako jednofázový transformátor). Za předpokladu, že vstupní vinutí je zapojeno do hvězdy, platí rovnice (2.15) pro vstupní napětí každé fáze. Jestliže výstupní vinutí je zapojeno do trojúhelníku a zatížení transformátoru je popsáno výstupními síťovými proudy, fázové proudy podléhají rovnicím (2.6). Nesymetrické zatížení transformátoru se dá řešit více způsoby. Záleží, které hodnoty jsou k dispozici, ale vždy by se mělo vycházet ze vztahů odvozených výše.[2]

2.2 Nesymetrické zatížení transformátorů s vyvedeným nulovým bodem

Pokud je výstupní vinutí zapojeno do hvězdy (nebo lomené hvězdy) s vyvedeným středem, který je připojen k zemi nebo k nulovému vodiči, může se u nesymetrické zátěže transformátoru objevit další proud I_d , proud nulovým vodičem. Poté by pro soustavu platil vztah (2.2). Pokud je proud protékající nulovým vodičem nenulový, je možné soustavu proudů I_a , I_b a I_c rozložit na soustavu netočivou, zpětnou a souslednou, kde společně se můžou určit složky sousledné a zpětné vazby [2]:

$$\begin{aligned} I_a &= I'_a + I_{a0} , \\ I_b &= I'_b + I_{b0} , \\ I_c &= I'_c + I_{c0} , \end{aligned} \tag{2.17}$$

Kde I'_a, I'_b, I'_c je součet zpětné a sousledné složky proudu daných fází a $I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} = I_d/3$ je netočivá složka proudu. Jelikož součet sousledných a zpětných složek proudů jednotlivých fází je roven nule, budou se za předpokladu, že převod transformátoru $p_{12} = 1$ proudy I'_a, I'_b, I'_c rovnat proudům jim v rovnováze $-I'_a, -I'_b, -I'_c$. [2]

Je-li vstupní vinutí zapojeno do hvězdy či trojúhelníku s vyvedeným uzlem, respektive mohou-li vstupním vinutím protékat proudy netočivé soustavy, proudy nulové soustavy I_{a0} , I_{b0} a I_{c0} můžou být kompenzovány vstupní stranou.[2]

$$\begin{aligned} I_{Af} &= -(I'_a + I_{a0}) = -I_a, \\ I_{Bf} &= -(I'_b + I_{b0}) = -I_b, \\ I_{Cf} &= -(I'_c + I_{c0}) = -I_c, \end{aligned} \quad (2.18)$$

V případě, kdy je vstupní vinutí zapojeno do hvězdy s vyvedeným uzlem, síťové proudy se rovnají fázovým. Při zapojení vstupního vinutí do trojúhelníku se z fázových proudů vypočtou síťové za pomoci vztahů (2.9). V případě, že vstupní vinutí je zapojeno do hvězdy bez vyvedené nuly, neprotékají proudy netočivé soustavy. Jsou tedy síťové i fázové hodnoty proudů ve vstupním vinutí.[2]

Magnetické pole vytvořené proudy netočivé soustavy, které protékají ve výstupním vinutí, bude indukovat ve fázích vstupního i výstupního vinutí nezanedbatelné elektromotorické síly netočivé soustavy. Jednofázové pole netočivé soustavy je vytvořené proudy netočivé soustavy, které jsou ve všech vinutí ve fázi. Pro elektromotorické síly vytvořené protékajícími proudy netočivé soustavy platí následující soustava rovnic [2]:

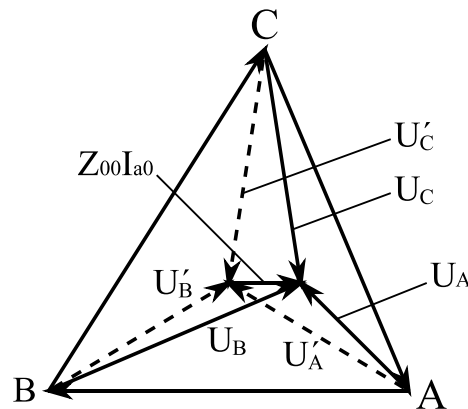
$$\begin{aligned} U_A - I_{Af}Z_1 &= -E_A - E_0, \\ U_B - I_{Bf}Z_1 &= -E_B - E_0, \\ U_C - I_{Cf}Z_1 &= -E_C - E_0, \end{aligned} \quad (2.19)$$

Efektivní hodnota elektromotorické síly indukované základním trojfázovým polem nese označení E_A , E_B a E_C a efektivní hodnota elektromotorické síly indukované polem netočivé soustavy nese označení E_0 . Je-li transformátor v zapojení hvězda – hvězda s vyvedenou nulou platí v rovnicích (2.19) vztah (2.8) a že součet všech elektromotorických sil indukovaných trojfázovým polem je roven nule, z čehož vyplývá vztah [2]:

$$U_A + U_B + U_C = -3E_0 = 3I_{a0}Z_{00}, \quad (2.20)$$

Kde $Z_{00} = -E_0/I_{a0}$ je celková nulová impedance. Vstupní fázová napětí lze určit z rovnic (2.15) a (2.20) [2]:

$$\begin{aligned} U_A &= \frac{1}{3} (U_{AB} - U_{CA}) + I_{a0}Z_{00} = U'_A + I_{a0}Z_{00} , \\ U_B &= \frac{1}{3} (U_{BC} - U_{AB}) + I_{b0}Z_{00} = U'_B + I_{b0}Z_{00} , \\ U_C &= \frac{1}{3} (U_{CA} - U_{BC}) + I_{c0}Z_{00} = U'_C + I_{c0}Z_{00} , \end{aligned} \quad (2.21)$$



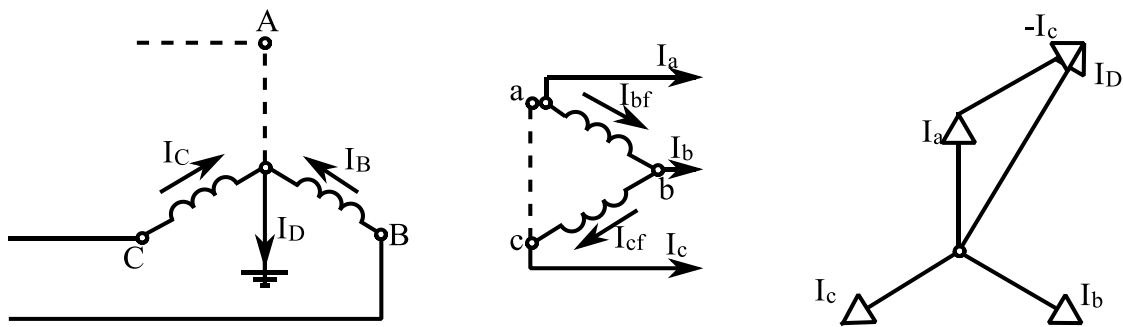
Obr. 2.3 Fázorový diagram uvažující magnetické pole vybuzeané netočivou soustavou proudů [2]

Fázorový diagram fázových a síťových napětí viz obrázek (2.3) je v souladu s rovnicemi (2.21). Z obrázku (2.3) je vidět, že těžiště trojúhelníku fázorů síťových napětí je oproti středu fázorů fázových napětí posunuto o $I_{a0}Z_{00}$. Velikost výstupních napětí se dostane odečtením úbytku ve vinutí vod vstupních napětí, získaných ze vztahů (2.21).[2]

Pokud je v zapojení hvězda – hvězda s vyvedenou nulou velký proud netočivé soustavy, dochází k nezanedbatelnému porušení souměrnosti fázových napětí. Současně dochází k velkému zvětšování magnetického toku, což vede k přesycení jádra, které je fázově nejbližší k poli vytvořenému proudy netočivé soustavy. Z tohoto důvodu by měla být snaha omezení proudu protékajícího nulovým vodičem. Proud protékající nulovým vodičem by neměl přesáhnout hodnotu 25 % jmenovitého proudu. U plášťových transformátorů se mohou indukční čáry magnetického pole uzavírat přes magnetický obvod transformátoru. Nulová impedance magnetického obvodu transformátoru je poměrně veliká, srovnatelná s impedancí naprázdno. Z tohoto důvodu poměrně vysoké elektromotorické síly mohou vytvořit i velmi malé proudy netočivé soustavy.[2]

2.3 Chod transformátoru s odpojenou fází

Dočasně je možné přenášet energii pouze přes dvě fáze, je-li původně trojfázová soustava zapojena do hvězdy s vyvedenou nulou – trojúhelník a v jedné fázi dojde k poruše, je možný, dočasný nesymetrický chod trojfázové skupiny. Vstupní napětí U_B a U_C budou stejná a budou fázově posunutá o 120° při dobrém uzemnění nulového bodu. Provoz s odpojenou fází je dočasně možný u trojfázového transformátoru, u kterého (například kvůli opravě) bylo odpojeno a sejmuto vinutí jednoho jádra nebo při zvýšení napětí dvěma jednofázovými transformátory, v případě, že jsou jejich vstupní vinutí zapojena do dvouramenné hvězdy s vyvedenou a dobře uzemněnou nulou a výstupní vinutí je zapojeno do rozpojeného trojúhelníku.[2]



Obr. 2.4 Transformátor s odpojenou fází [2]

2.4 Jednosměrná magnetizace

U trojfázových transformátorů je nejčastějším spojením jednopólové spojení hvězda - hvězda, u kterého lze pozorovat jednosměrná magnetizace. Zda u jednofázového spojení platí, že počet závitů primárního vinutí se rovná počtu závitů sekundárního vinutí, na všech jádrech transformátoru vzniká stejně velký přebytek proudu. U jednofázového transformátoru se magnetický tok způsobený přebytkem proudu uzavírá mimo magnetický obvod transformátoru. Uzavírá se nejčastěji stahovací konstrukcí, nádobou transformátoru nebo vzduchem. Tím dochází k tvorbě vířivých proudů, které nechají vzniknout velké ztrátové výkony. Tato energie se přeměňuje v teplo. Použitím plášťového transformátoru se magnetický tok uzavírá přes spojky či pomocné jádra, což vede k velké vodivosti přechodu a velkým úbytkům napětí. Vliv jednosměrné magnetizace se dá omezit například spojením jednoho z vinutí do trojúhelníku, spojením výstupního vinutí do lomené hvězdy či požitím

transformátoru se třemi vinutími, kde jeho terciální vinutí bude zapojeno do trojúhelníku.[2,14,15]

3 Ztráty transformátoru

Často se předpokládá, že činnost transformátoru je beze ztrát, ale ve skutečnosti se při činnosti transformátoru ztráty projevují. Většinou jsou tyto ztráty děleny na ztráty na prázdno (ΔP_0) nezávislé na zatěžovacím proudu, jsou závislé na napětí, ztráty nakrátko (ΔP_k) závislé na zatěžovacím proudu a přídavné ztráty (ΔP_p), které zahrnují ztráty skinefekttem a ztráty vířivými proudy v masivních částech konstrukce.[1,8]

3.1 Ztráty naprázdno

Ztráty naprázdno jsou téměř ztráty v železe, musí se také připočíst Joulovy ztráty primárního vinutí (ΔP_{jp}). Vznikají vždy po připojení transformátoru na napětí, nezáleží na připojené zátěži. Platí pro ně vztah [1,8,3]:

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} = \Delta P_{FeH} + \Delta P_{FeV} + \Delta P_{jp} \quad (3.1)$$

Hysterezní ztráty závisí na ploše hysterezní smyčky. Proto by se při návrhu transformátoru měly používat materiály magnetických plechů s úzkou hysterezní smyčkou. Čím užší hysterezní smyčka, tím menší hysterezní ztráty. Hysterezní ztráty se dají vyjádřit vzorcem [1,3,6]:

$$\Delta P_{FeH} = B^2 f \quad (3.2)$$

Ztráty vířivými proudy vznikají díky působení magnetického pole v jádře transformátoru, kde indukuje napětí tvořící nežádoucí proudy. Vířivé proudy mají charakter proudových smyček vytvářejících teplo. Ztráty vířivými proudy lze omezit nařezáním magnetického jádra na vzájemně odizolované plechy a přidáním křemíku (4 až 5 %), který snižuje elektrickou vodivost jádra. Ztráty vířivými proudy popisuje vzorec [1,3,6]:

$$\Delta P_{Feh} = B^2 f^2 \quad (3.3)$$

3.2 Ztráty nakrátko

Ztráty nakrátko jsou ztráty, které způsobuje průchod proudu vinutími transformátoru. Z čehož vyplývá, že jsou závislé na zatěžovacím proudu. Platí zde vztah [1,8,3]:

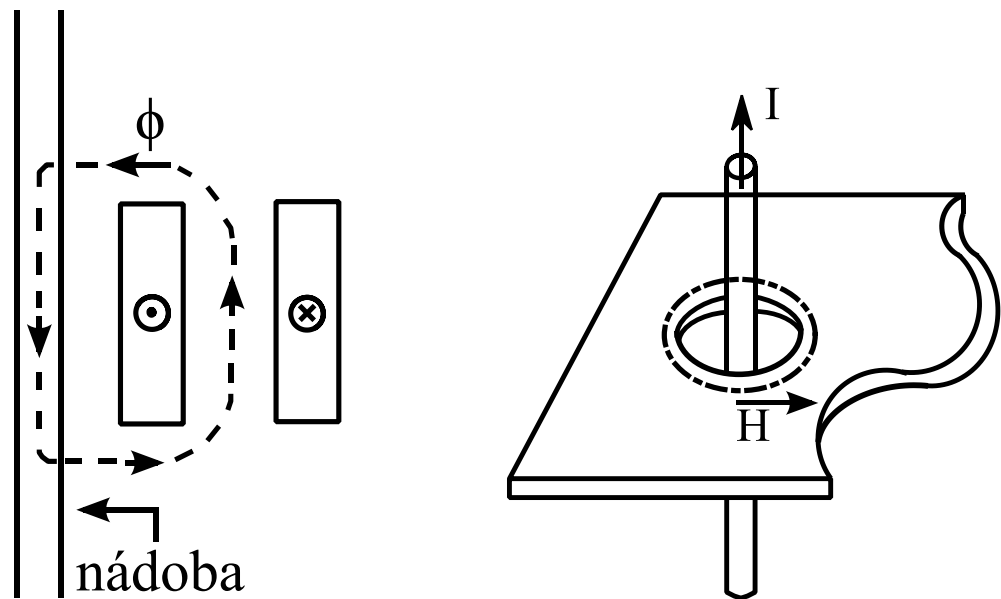
$$\Delta P_k = \Delta P_j = m (R_1 + R_2) I^2 + \Delta P_p \quad (3.4)$$

3.3 Ztráty přídavné

Ve vodičích (vinutí a přívodní vodiče) nacházejících se ve střídavém rozptylovém magnetickém poli, jsou vířivé proudy způsobující přídavné ztráty. Přídavné ztráty rostou s rostoucím rozměrem vodiče kolmého k rozptylovému poli. V místech, kde se rozptylový magnetický tok ohýbá (v krajích nahoře a dole) se mnohdy provádějí cívky z paralelně spojených vodičů o menších rozměrech. Další přídavné ztráty vznikají za pomoci vířivých proudů, které se indukují v kovových částech v dosahu rozptylového magnetického toku (stěny nádoby, stahovací konstrukce magnetického obvodu). Přídavné ztráty se dají připočítávat ke ztrátám nakrátko.[3,5,6,11]

3.3.1 Rozptylové ztráty v nádrži

Rozptylové ztráty v nádrži tvoří hlavní část celkových přídavných ztrát u velkých výkonových transformátorů. U transformátorů jsou především dva druhy povrchového buzení. V prvním případě (viz obrázek (3.1)) je pole tangenciální (například průchodka stěnou transformátoru). Velikost tangenciálního pole je přímo úměrná proudu procházejícího vodičem. Síla magnetického pole na povrchu desky může být přibližně stanovena dle principu superpozice. V druhém případě (viz obrázek (3.2)), kde magnetický rozptylový tok vyzařující z vnějšího povrchu vinutí vytváří ztráty vířivými proudy ve stěnách nádoby transformátoru. Ačkoli rozptylová hustota magnetického toku ve stěnách je malá, může být ztráta v nádobě velká vzhledem k velké ploše stěn. Díky těmto ztrátám by u velkých výkonových transformátorů mohlo docházet k lokálnímu zahřívání nádoby, teplo je však redukováno olejem. Také pomáhá tepelná vodivost materiálu použitého k výrobě nádoby.[3,4,11]



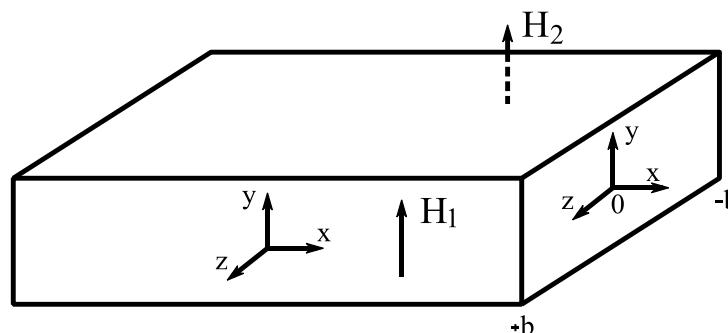
Obr. 3.1 a 3.2 vznik přídavných ztrát v nádobě a průchodkou [3]

Pro výpočet přídavných ztrát tohoto typu bylo vytvořeno několik metod. Při vývoji nových zařízení jsou nejvíce používány 2D a 3D simulace, protože odpovídají skutečnému návrhu. Bez nutnosti výroby prototypu je možné si za pomoci těchto metod ověřit či vyvrátit zjištěné předpoklady. Pomocí 2D a 3D modelů lze zjistit rozložení magnetického pole uvnitř transformátoru, rozložení magnetické indukce nebo oteplení jednotlivých částí transformátoru. Díky tomu lze vypočítat ztráty. Pro výpočet ztrát je nutný program pro řešení numerických metod. Protože metody pro řešení elektromagnetických polí vedou k složitému řešení, které je vyjádřeno parciálními diferenciálními rovnicemi. Používané metody řešení elektromagnetických polí jsou: metoda hraničních prvků, metoda konečných objemů, integrální metoda, metoda konečných diferencí a nejpoužívanější metodou je metoda konečných prvků.[3,4]

Jelikož je transformátor trojrozměrná a vysoce asymetrická struktura, výpočet přídavných ztrát je komplikovaný zejména magnetickou nelinearitou, neschopností oddělit přesné rozptylové ztráty komponentů z celkových testovaných ztrát, omezením experimentálních ověřovacích metod pro velké výkonové transformátory, dále je obtížné rychle a přesně provést výpočty pro účinky rozptylového pole.[3,4]

3.3.2 Ztráty vířivými proudy pro různé povrchové buzení

K analýze vlivu různých typů buzení na rozptylové ztráty je potřeba zvážit strukturální složku, jak je znázorněno na obrázku (3.3). Vzorek je umístěn ve střídavém magnetickém poli ve směru osy y , který má maximální velikost amplitud H_1 a H_2 . Je možné uvažovat, že vzorek je nekonečně dlouhý ve směru osy x . Dále lze předpokládat, že proudová hustota a intenzita magnetického pole H jsou funkcí pouze podle osy z . Uvažuje-li se, že vzorek má lineární magnetické vlastnosti.[3,6]



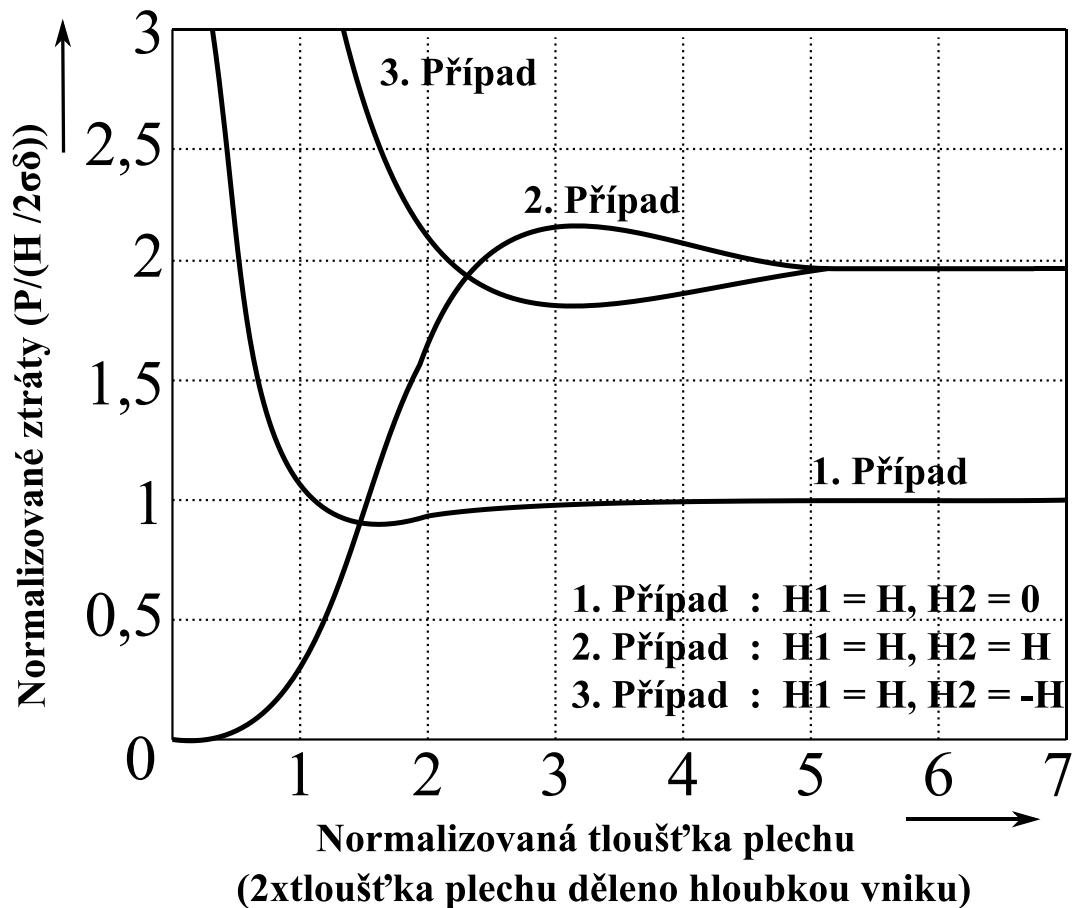
Obr. 3.3 Přídavné ztráty v konstrukčních částech [3]

V tomto případě se okrajové podmínky vypočítají takto [3]:

$$H = H_1 \quad \text{když } z = +b,$$

$$H = H_2 \quad \text{když } z = -b, \quad (3.5)$$

Velikost přídavných vířivých ztrát pro tři různé případy povrchového buzení vzatých na jednotku plochy lze vidět na obrázku (3.4).[3]



Obr. 3.4 ztráty vířivými proudy pro různé povrchové buzení [3]

V prvním případě $H_1 = H$ a $H_2 = 0$. Jak se dalo očekávat, ztráty tvořené vířivými proudy se v tomto případě snižují s tloušťkou plechu až do tloušťky 1 až 2 krát hloubka vniku. Tento případ se u transformátoru vyskytuje v situaci, kde vodič, jímž prochází proud je umístěn rovnoběžně k vodivé desce (nádobu z měkké oceli). Když poměr šířka desky (vzorku) oproti hloubce vniku roste, tak se činný výkon blíží jednotce tloušťky. Aktivní ztrátový výkon je u tenkých desek velmi vysoký. Jelikož se zmenšuje tloušťka desky a tím i její průřez, odpor roste. Tím, že deskou teče stále stejně velký proud, se zvětšují ztráty.[3,6]

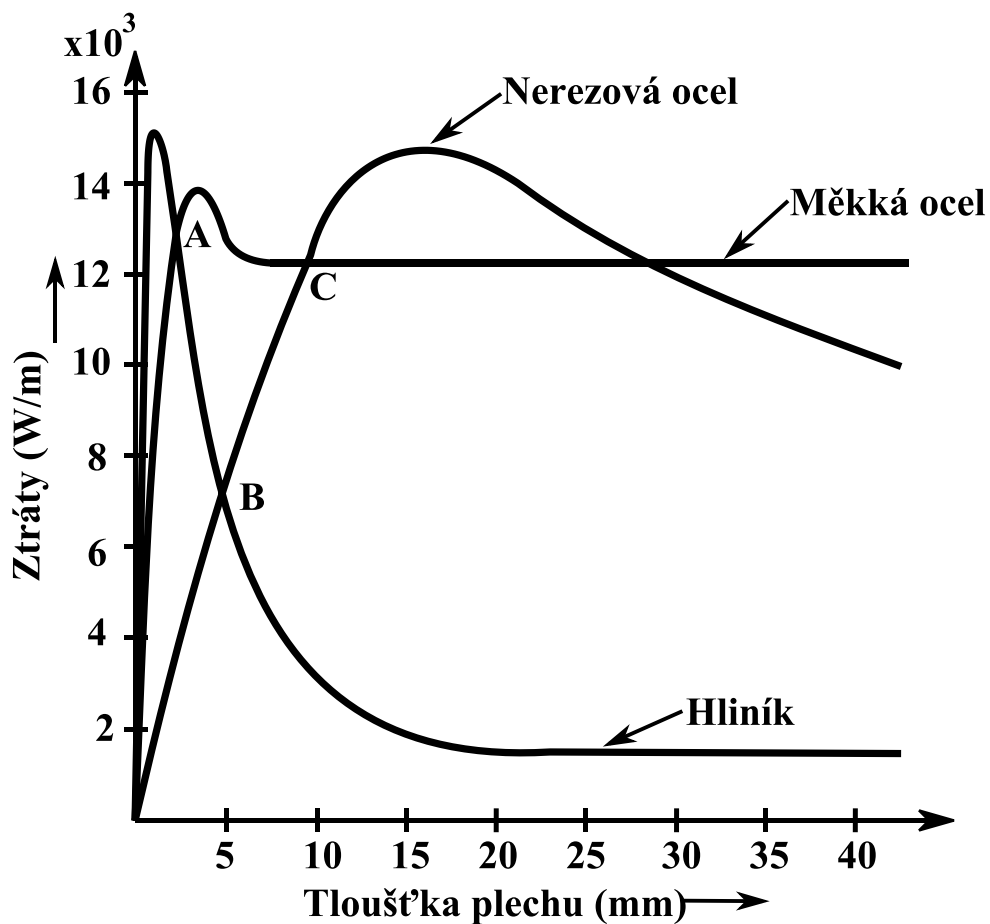
V druhém případě $H_1 = H_2 = H$. Ztráty způsobené vířivými proudy rostou spolu s šířkou desky. U transformátorů tato situace nastává hlavně v průchodkách nebo pouzdrech. Proud prochází přes otvory v kovových deskách. Za předpokladu, že poměr tloušťky plechu ku hloubce vniku bude mnohem větší než jedna, tak se celková ztráta ustálí na téměř konstantní hodnotě. Pokud se tloušťka plechu bude zmenšovat, tak se i ztráty budou na rozdíl od případu jedna zmenšovat. Z řešení okrajových podmínek je možné zjistit, že H_1 a H_2 jsou v opačném směru. Proto při dostatečně malé tloušťce se účinky těchto dvou proudů téměř vyruší. Tím se i ztráty sniží k nule.[3]

Ve třetím případě $H_1 = -H_2 = H$. Zde přidavné ztráty s narůstající tloušťkou klesají. Pro maximální tloušťku (mnohem větší, než je hloubka vniku) se ztráty ustálí na stejné konstantní hodnotě jako v případě dva. Snižováním tloušťky plechu se ztrátový výkon bude zvyšovat do vysokých hodnot ze stejného důvodu jako v prvním případě. Vodič prochází menším otvorem v plechu a tento zvýšený odpor zvýší ztráty.[3]

V předchozích třech příkladech se předpokládá, že intenzita magnetického pole je tečná k povrchu konstrukční části.[3]

3.3.3 Vliv materiálu na rozptylové ztráty

V následujícím grafu je srovnání třech různých materiálů a to magnetická ocel, hliník a nemagnetická nerezová ocel.[3]



Obr. 3.5 vliv materiálu na přidavné ztráty [3]

Magnetická ocel: Dá se předpokládat, že magnetická ocelová deska je nasycena z důvodu malé hloubky vniku. Z tohoto důvodu hodnota relativní permeability odpovídá saturační podmínce, kde permeabilita magnetické oceli je $\mu_r = 100$ a konduktivita je $7 \cdot 10^6$ S/m. Díky těmto hodnotám se získá hloubka vniku 2.69 mm při 50 Hz. Z grafu je patrné, že ztrátový výkon dosahuje maximální hodnoty asi ve dvounásobné hloubce hloubky vniku a poté zůstává konstantní. Toto chování podporuje teorii vířivých proudů a skin efektu. Vzhledem k vířivým proudům jsou ztráty soustředěny pouze na povrchu. Zvyšováním tloušťky plechu na více než pár hloubek vniku se už činný odpor plechu nemění a tím i způsobené ztráty zůstávají konstantní.[3,11]

Hliník: V případě hliníku, který má permeabilitu $\mu_r = 1$ a konduktivitu $30 \cdot 10^6$ S/m, je získána hloubka vniku 13,2 mm při frekvenci 50 Hz. To lze pozorovat z grafu, kde se nejprve ztráta s rostoucí tloušťkou zvětšuje a poté nastane zlom a s rostoucí tloušťkou se ztráty začnou zmenšovat. Tato situace je ekvivalentem k odporové indukční cívce. Pro malé tloušťky (tenké desky) nastane případ, kde efektivní odpor je větší ve srovnání s indukčností. Z tohoto důvodu má náhradní obvod převážně odporový charakter. Ztráty by se daly vypočítat vydělením napájecího napětí odporem. Zvýšení tloušťky hliníkové desky vede ke snížení odporu z důvodu zvýšení průřezu. Tím se zvětší vířivé proudy, čímž se i ztráty lineárně zvětšují.[3]

Při dalším zvýšení tloušťky desky se odpor bude dále zmenšovat, zatím co indukčnost se postupně zvětšuje a i charakter náhradního obvodu se postupně mění na induktivní. Výkonová ztráta překlene vrchol a začne klesat, jak se charakter náhradního obvodu mění na induktivní. Když se tloušťka plechu blíží hloubce vniku, pole a vířivé proudy téměř výhradně řídí induktivní efekty. Od určité tloušťky (výrazně vyšší než hloubka vniku) se i přes zvětšování tloušťky plechu pole dále neproniká. Ekvivalentní odpor a indukčnost jsou už na tloušťce plechu nezávislé. Výkonová ztráta se také blíží konstantní hodnotě.[3]

Nemagnetická nerezová ocel: Chování nemagnetické oceli je velice podobné jako u hliníku, protože oba materiály jsou nemagnetické. Hloubka vniku je ve srovnání s hliníkem mnohem větší, z tohoto důvodu je křivka popisující hliník mnohem více strmá. Pro běžné třídy nerezových materiálů s relativní permeabilitou 1 a konduktivitou $1,136 \cdot 10^6$ S/m je hloubka vniku 66,78 mm při 50 Hz. Dalším rozdílem je, že při zvyšování tloušťky plechu se hodnota ztrát ustálí na vyšší hodnotě než u hliníku, ale nižší než u magnetické oceli.[3]

Použití nemagnetické a vysoce vodivé desky (z hliníku nebo mědi) je v okolí vodičů, kterými protékají velké proudy a které vyzařují rozptylové pole. Tyto desky by měly mít tloušťku alespoň srovnatelnou s hloubkou vniku (13,2 mm pro hliník a 10,3 mm pro měď při 50 Hz) ke snížení ztráty na poměrně nízkou hodnotu. Výpočet minimální hodnoty ztráty je získán z tloušťky X_{min} . Pro získání tloušťky X_{min} je použit následující vzorec [3]:

$$X_{min} = \frac{\pi}{2} \delta \quad (3.6)$$

Po dosazení do vzorce je získána hodnota pro hliník 20,7 mm při 50 Hz. Podílem hodnoty X_{min} a hloubky vniku hliníku se získá normalizovaná hodnota ztráty 1,57. To souhlasí s grafem na obrázku (3.4) případ 1 (za předpokladu, že hodnota tangenciálního pole H_2 se blíží nule, což je přiměřený předpoklad pro tloušťku desky jeden a půl krát větší než hloubka vniku daného materiálu). Pokud bude použit hliník nebo měď jako elektromagnetický štít, musí se také myslet na zahřívání v důsledku velikých vířivých ztrát. Tato deska by dostatečnou tloušťkou měla předejít přehřívání se a minimalizovat rozptylové ztráty.[3]

Vzhledem k tomu, že hloubka vniku u měkké oceli (2,69 mm) je obvykle mnohem menší, než tloušťka požadovaná mechanickými či konstrukčními požadavky, nebude možné redukovat ztráty vířivými proudy změnou tloušťky materiálu. Je nutné tedy ztráty redukovat magnetickými bočníky (vyrobené z materiálu o malé reluktanci) nebo elektromagnetickým stíněním (hliník nebo měď). Tato opatření na minimalizaci přídavných ztrát se používají u středních a velkých transformátorů, kde konstrukční díly jsou vyrobeny z měkké oceli.[3,4]

Z obrázku (3.5) je zřejmé, že ztráta nerezového plechu je menší než u plechu vyrobeného z měkké oceli při nižších hodnotách šířky. Proto při výrobě konstrukčního prvku z nerezové oceli je vyvinuta snaha o výrobu tak tenkého kusu, jak jen to konstrukční požadavky dovolí. Jde o snahu dosáhnout co nejmenších přídavných ztrát. Proto různé konstrukční části z měkké oceli jsou nahrazovány alternativami z nerezové oceli. Pokud se tloušťka materiálu pohybuje v rozmezí 10 mm a menší rozptylové ztráty jsou také menší.[3]

4 Metody měření výkonů v trojfázové síti

Pro měření trojfázové sítě se nejčastěji používají následující metody či metody jím podobné.

4.1 Görgesovo zapojení

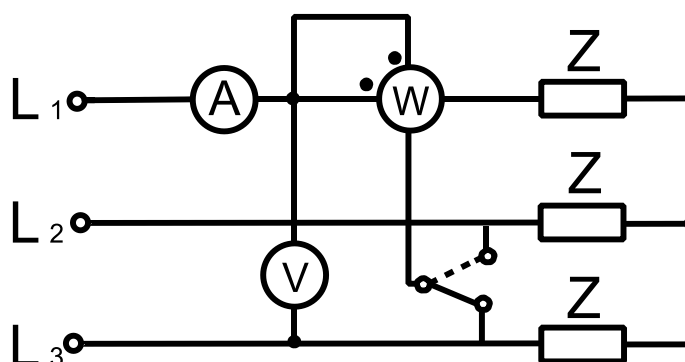
Görgesovo zapojení umožňuje měřit celkový činný a jalový příkon trojfázové sítě za pomoci jednoho wattmetru a spínače. Ale pouze u souměrné zátěže připojené na souměrnou soustavu napětí. Kde v poloze 1 přepínače je na wattmetru naměřená hodnota činného výkonu P_1 dle vzorce [13]:

$$P_1 = U_{31} I_1 \cos(\varphi - 30^\circ) \quad (4.1)$$

a v poloze 2 je naměřena hodnota činného výkonu P_2 dle vzorce [13]:

$$P_2 = U_{21} I_1 \cos(\varphi + 30^\circ) \quad (4.2)$$

Jelikož v souměrné síti se U_{31} rovná U_{21} a tím pádem i $\sqrt{3}U_1$, celkový činný výkon lze získat součtem výkonů P_1 a P_2 . Pro výpočet celkového jalového výkonu se od sebe P_1 a P_2 odečte a výsledek vynásobí odmocninou ze tří.[13]

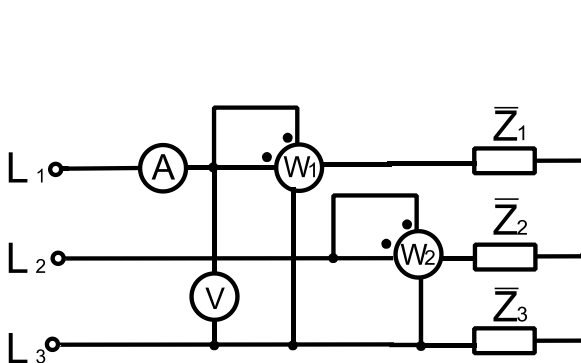


Obr. 4.1 Görgesovo zapojení [13]

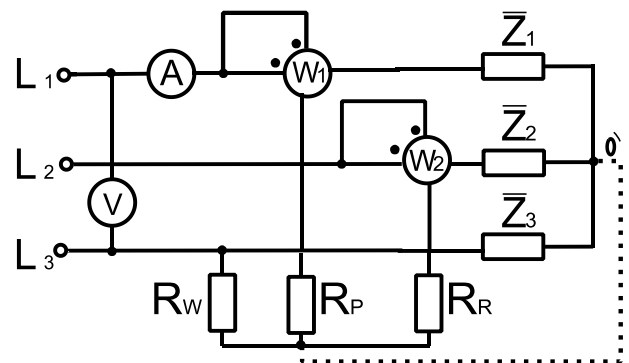
4.2 Aronovo zapojení

Pro měření činného výkonu obecné trojfázové soustavy, za pomoci dvou wattmetrů i při nesymetrické síti a neharmonického průběhu napětí i proudů, lze použít Aronovo zapojení. Soustava ale musí splňovat podmínku vyváženosti proudů. (tj. součet proudů všech fází se musí rovnat nule). Při symetrické síti i zátěži lze určit z hodnot obou wattmetrů celkový činný i celkový jalový výkon, obdobně jako u Görgesovo zapojení. Při nesymetrické zátěži se dá určit jen celkový činný příkon.[13]

Pro určení jalového výkonu se musí Aronovo zapojení trochu změnit. Vytvoří se „umělá nula“ za pomoci třech předřadných rezistorů. Což umožní při tří vodičově symetrické síti určit trojfázový jalový výkon nesymetrické zátěže. Zde wattmetry měří reálnou část procházejícího proudu a stávajícího napětí, tím se získá P_1 a P_2 . Odečte-li se P_1 a P_2 a výsledek vynásobí-li se odmocninou ze tří, je získán celkový jalový výkon. Ampérmetry a voltmetry je zde možné zapojit pro kontrolu rozsahů wattmetru.[13]



Obr. 4.2 Aronovo zapojení [13]

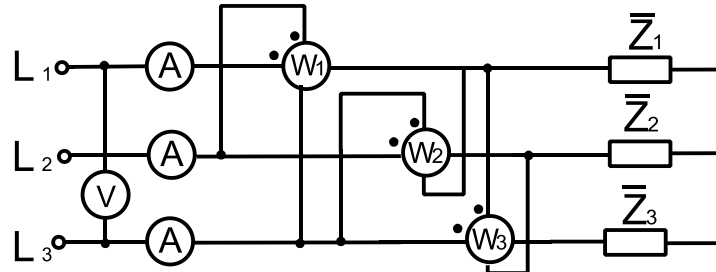


Obr. 4.3 Upravené Aronovo zapojení [13]

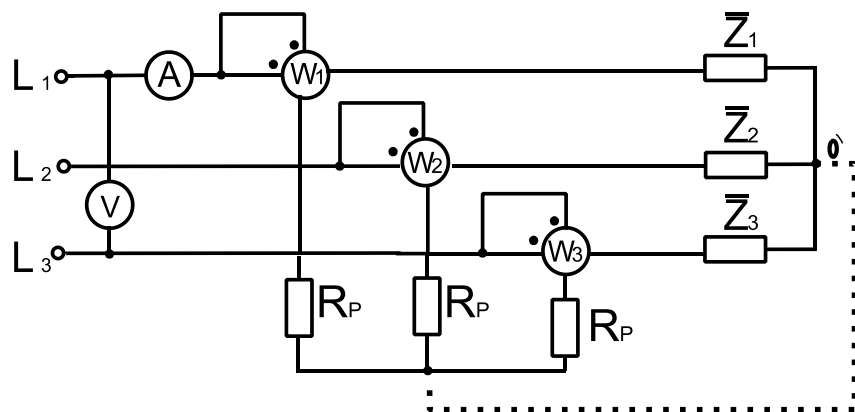
4.3 Měření třemi wattmetry

Pro měření trojfázového jalového výkonu třemi wattmetry je možné použít zapojení dle obrázku (4.4), kde wattmetry W_1, W_2 a W_3 měří při souměrné síti $\sqrt{3}$ krát velikost jalového výkonu jedné fáze. U měření trojfázového činného výkonu se musí znovu vytvořit „umělá nula“ pomocí předřadných rezistorů dle obrázku (4.5). Jednotlivé wattmetry měří činný výkon dané fáze. Celkový činný výkon soustavy je určen součtem činných výkonů všech fází.[13]

Měření výkonů impedancí jednotlivých fází nesymetrické zátěže se provádí tak, že uzel nesymetrické zátěže je propojen s uzlem umělé fáze wattmetrů. V případě, že je zanedbána spotřeba měřících přístrojů, wattmetry měří výkon jednotlivých impedancí.[13]



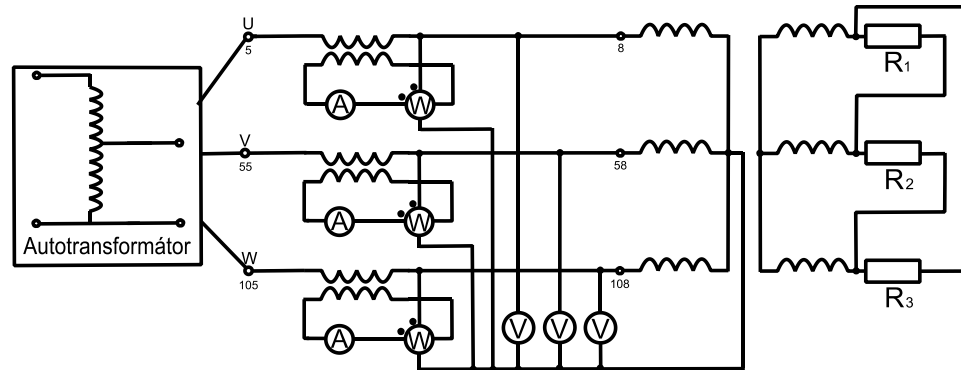
Obr.4.4 tři wattmetry, měření jalového výkonu[13]



Obr. 4.5 tři wattmetry s vyvedenou nulou[13]

5 Vlastní měření

5.1 Schéma zapojení



Obr. 5.1 Schéma zapojení

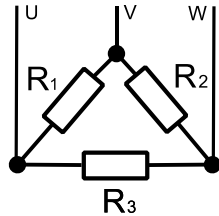
5.2 Postup měření

Nejdříve byl zapojen obvod. Obvod byl napájen z autotransformátoru (součást stolu). Vývody autotransformátoru jsou na zadní straně stolu. Vývody byly zapojeny na svorkách 5, 55, 105 (součást stolu) z důvodu rozdvojení a lepšího přístupu. Dále byla zapojena „proudová“ část obvodu, na každou fázi se zapojily primární svorky měřicího transformátoru proudu a na sekundární svorky do série proudovou cívku wattmetru a ampérmetr. U ampérmetru byl použit rozsah 5 A a u wattmetru rozsah 5 A / 60 V.

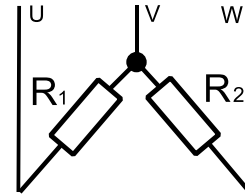
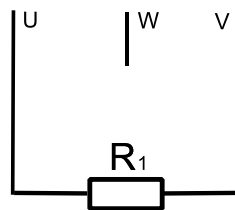
Poté se zapojila „napěťová“ část obvodu, což jsou napěťové cívky wattmetrů a voltmetry od každé fáze k nulovému vodiči dle obrázku (5.1). U voltmetru byl zvolen rozsah 65 V. Transformátor byl (pro přehlednost a dosah kabelu) k obvodu připojen také přes stůl a to za pomoci svorek (fáze 8,58,108 a nulový vodič 11 a 61).

První čtyři měření byla provedena u transformátoru bez nádoby. Kde první měření byla zátěž zapojena do symetrického trojúhelníku. Poté byla u každého měření odpojována jedna větev ($R_3 \Rightarrow \infty$, atd.) dle obrázků (4.7), (4.8) a (4.9), až poslední měření bylo naprázdno. U tohoto zapojení se musel přepnout rozsah měřicího transformátoru proudu z 20/5 na 2/5. Druhá polovina měření byla obdobná, ale transformátor byl vložen do nádoby.

Transformátor se musel z důvodu vyvedení nuly pouze u sekundárního vinutí použít "obráceně" (prohození primárního a sekundárního vinutí), z tohoto důvodu se také musela hlídat maximální hodnota procházejícího proudu.



Obr. 4.7 Zapojení zátěže do trojúhelníku

Obr. 4.8 Zapojení s odpojenou zátěží R_3 Obr. 4.9 Zapojení zátěže pouze R_1

5.3 Naměřené a vypočtené hodnoty

5.3.1 Tabulky naměřených a vypočtených hodnot pro měření bez nádoby

Zapojení	W_1 [W]	W_2 [W]	W_3 [W]	A_1 [A]	A_2 [A]	A_3 [A]	V_1 [V]	V_2 [V]	V_3 [V]
Obr. (4.7)	546,5	546,5	559,9	18,4	18,0	18,4	30,0	29,5	31,5
Obr. (4.8)	573,2	359,9	319,9	18,8	11,4	11,4	31,0	33,5	34,0
Obr. (4.9)	813,1	26,7	706,5	19,0	8,0	18,6	53,0	54,5	50,5
Naprázdko	29,2	13,3	13,3	1,4	1,2	1,6	49,0	49,5	51,5

Zapojení	Celkový výkon [W]	Průměrná hodnota proudu [A]	Průměrná hodnota napětí [V]
Obr. (4.7)	1652,9	18,3	30,3
Obr. (4.8)	1253,0	13,9	32,8
Obr. (4.9)	1546,3	15,2	52,7
Naprázdko	55,9	1,4	50,0

Zapojení	Účinník [-]	Zdánlivý výkon[VA]	Jalový výkon[VAr]
Obr. (4.7)	0,330030193	1662,3	176,0
Obr. (4.8)	0,327836879	1365,9	543,6
Obr. (4.9)	0,269159219	2401,6	1837,6
Naprázdko	0,138227513	209,0	201,4

5.3.2 Tabulky naměřených a vypočtených hodnot pro měření s nádobou

Zapojení	W1 [W]	W2 [W]	W3 [W]	A1 [A]	A2 [A]	A3 [A]	V1 [V]	V2 [V]	V3 [V]
Obr. (4.7)	519,9	546,5	573,2	18,0	18,0	18,6	30,0	29,5	31,5
Obr. (4.8)	559,9	359,9	319,9	18,8	11,4	11,4	30,0	34,0	34,0
Obr. (4.9)	826,5	26,7	719,8	17,2	8,0	18,8	54,0	55,0	50,5
Naprázdko	29,3	13,30	13,3	1,4	1,2	1,5	49,0	49,0	51,5

Zapojení	Celkový výkon [W]	Průměrná hodnota proudu [A]	Průměrná hodnota napětí [V]
Obr. (4.7)	1639,6	18,2	30,3
Obr. (4.8)	1239,7	13,9	32,7
Obr. (4.9)	1572,9	14,7	53,2
naprázdko	55,9	1,4	49,8

Zapojení	Účinník [-]	Zdánlivý výkon[VA]	Jalový výkon[VAr]
Obr. (4.7)	0,320907407	1656,2	233,9
Obr. (4.8)	0,330886525	1358,9	556,7
Obr. (4.9)	0,296604938	2339,3	1731,6
Naprázdko	0,14017438	205,3	197,6

5.4 Použité výpočty

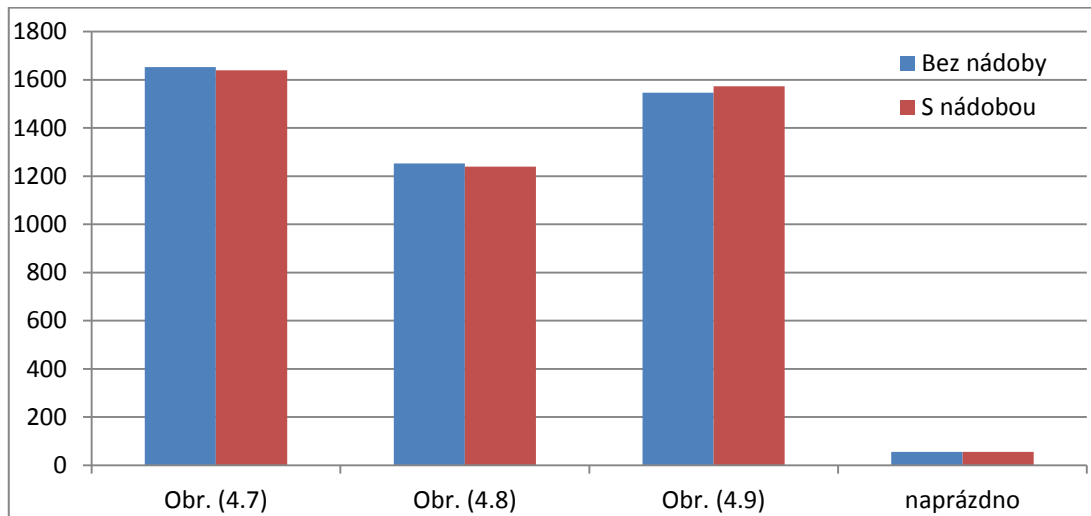
Pro výpočet účinníku se použije vzorec (5.1), pro výpočet zdánlivého výkonu lze použít vztah (5.2) a jalový výkon se dá spočítat dle vzorce (5.3).[1,2]

$$\cos \varphi = \frac{P}{3UI} \quad (5.1)$$

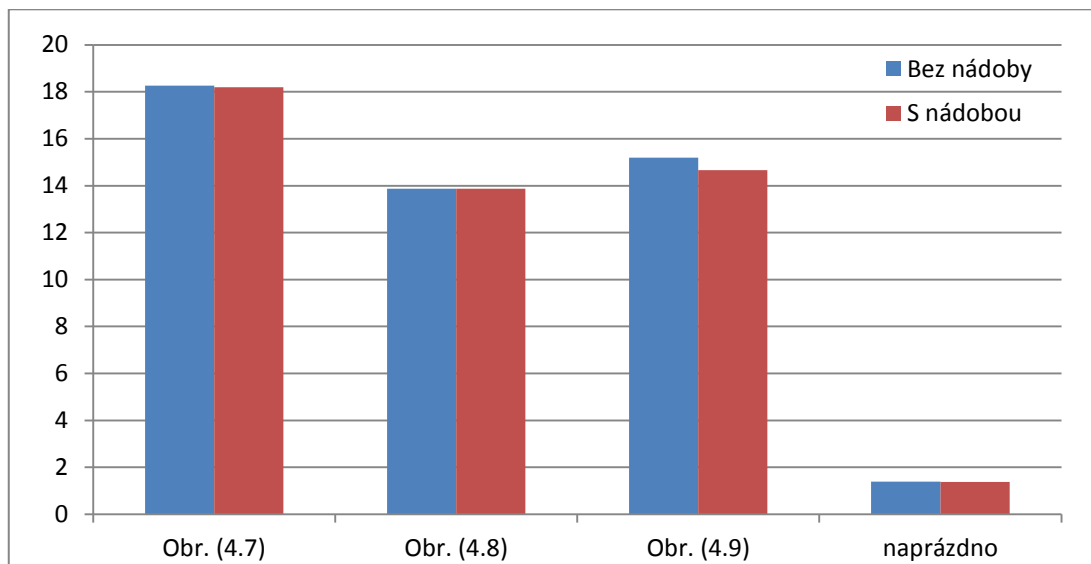
$$S = 3UI \quad (5.2)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (5.3)$$

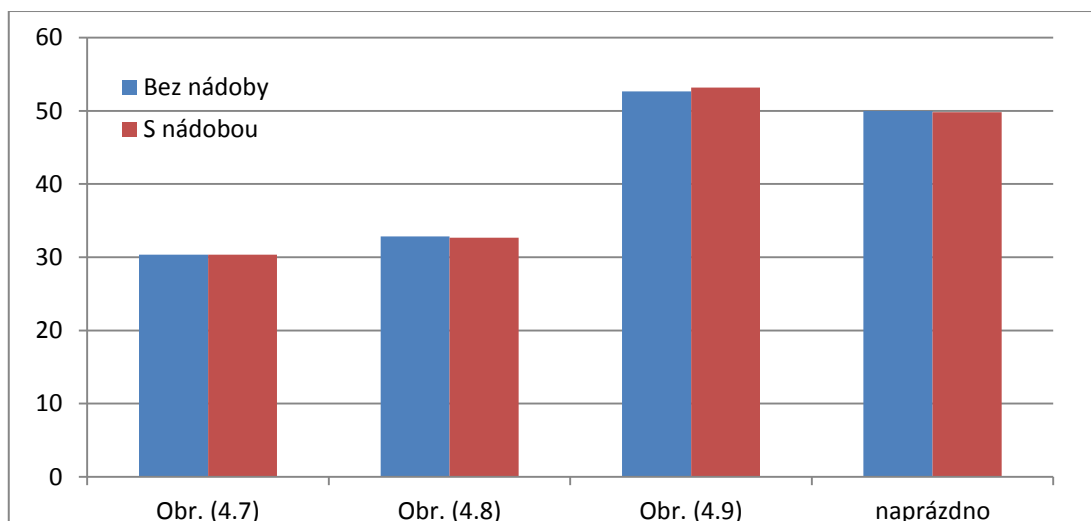
5.5 Grafy



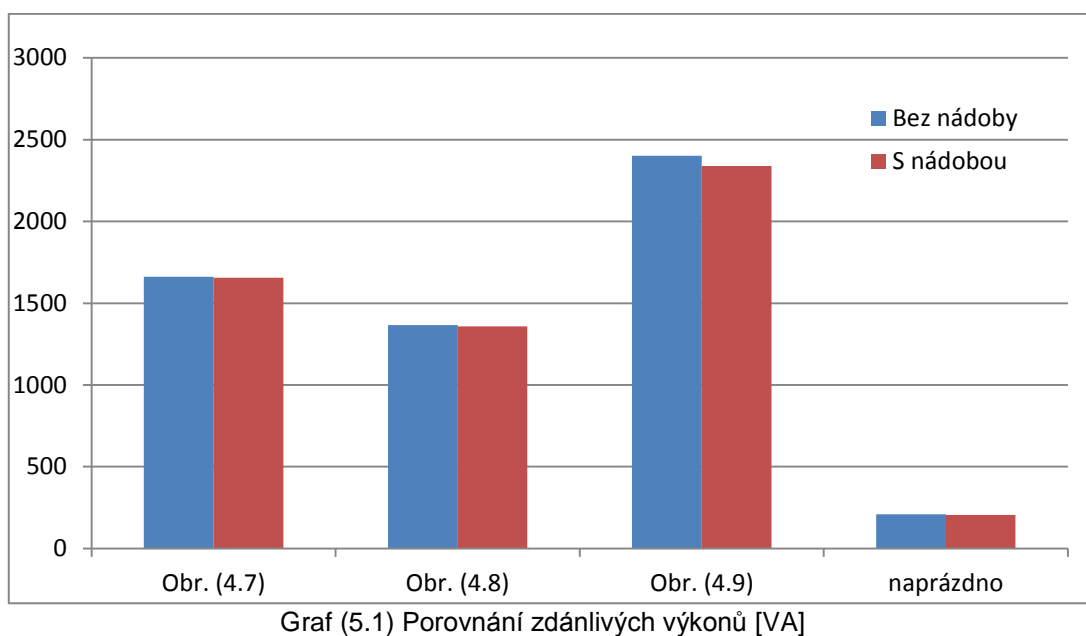
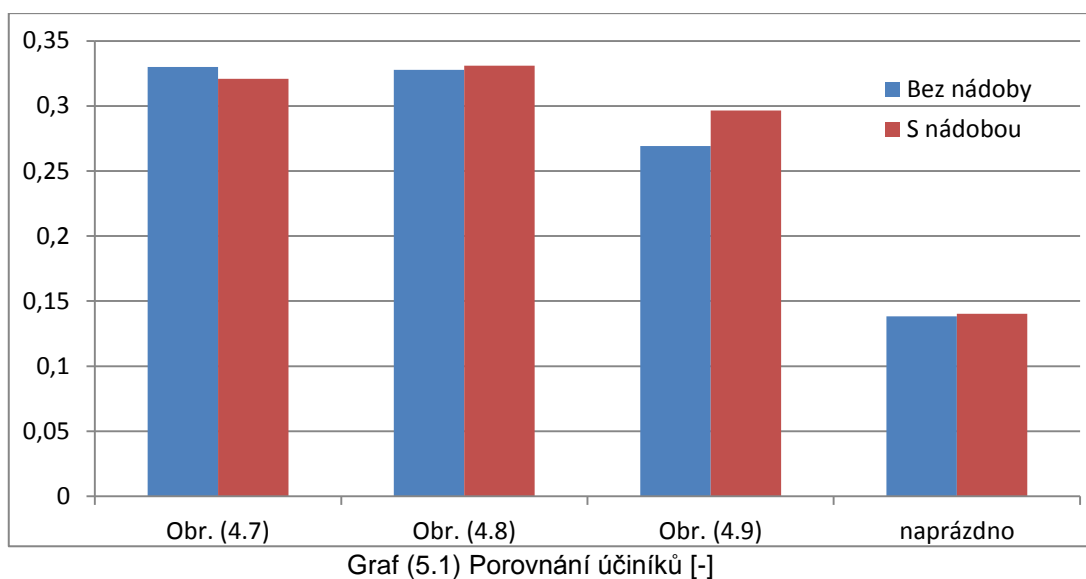
Graf (5.1) Porovnání činných výkonů [W]



Graf (5.1) Porovnání průměrných proudů v každém měření [A]



Graf (5.1) Porovnání průměrných napětí v každém měření [V]



5.6 Použité přístroje

Mezi použité přístroje patří především transformátor, dále tři ampérmetry, tři voltmetry, tři wattmetry, odpory zapojené do zátěže a v neposlední řadě autotransformátor jako součást pracovního stolu.

	výrobce	rozsahy	označení	přesnost
Voltmetry	METRA	130; 65 [V]	1150051	0,5 %
Ampérmetry	METRA	100; 20; 5 [A]	554889	1 %
Wattmetry	METRA	50[A]/60[V]	9088671	0,5 %

Transformátor – primární vinutí 3krát 380 [V] \pm 5 %,
sekundární vinutí 3krát 75 až 92 [V], IP = 00

Závěr

Cílem této práce bylo naměřit přídavné ztráty v nádobě transformátoru v nesouměrném režimu zatížení. Ze začátku je popisován princip transformátoru, druhy transformátoru a jeho části. Další kapitola byla věnovaná nesouměrnému zatížení transformátoru, výpočtům tohoto tématu a jednosměrné magnetizaci. Dále se tato práce zabývá ztrátami naprázdno, nakrátko a přídavnými, vlivem materiálu či druhu povrchového buzení na přídavné ztráty a vznikem přídavných ztrát v nádobě transformátoru. Poslední část je věnována měření.

Celkem proběhlo osm měření, kde první čtyři proběhla bez nádoby. Naměřené hodnoty v prvních čtyřech měřeních sloužily pro porovnání hodnot s hodnotami naměřenými v druhých čtyřech měřeních a to s nádobou. Mezi prvními čtyřmi a druhými čtyřmi měřeními je jediný rozdíl a to, že transformátor je v nádobě. Nejdříve se provede měření symetrického trojúhelníku a poté se odpojuje vždy jeden odpor ze zátěže.

Výsledek měření je, že u měřeného transformátoru s nádobou je velikost přídavných ztrát okolo jednoho procenta, což se z důvodu přesnosti dostupných měřících zařízení nedá označit za průkazný výsledek. Jelikož výsledek měření je hraniční s rozlišovacími schopnostmi dostupných přístrojů.

Proto použití opatření, které by zmenšovalo přídavné ztráty u měřeného transformátoru, by bylo z ekonomického hlediska neúčelné. Opatření jako například magnetický štít nebo zavěšení vodivé desky by měla význam až u větších transformátorů, kde by jednocentní ztráta vyvážila výrobní náklady daného opatření.

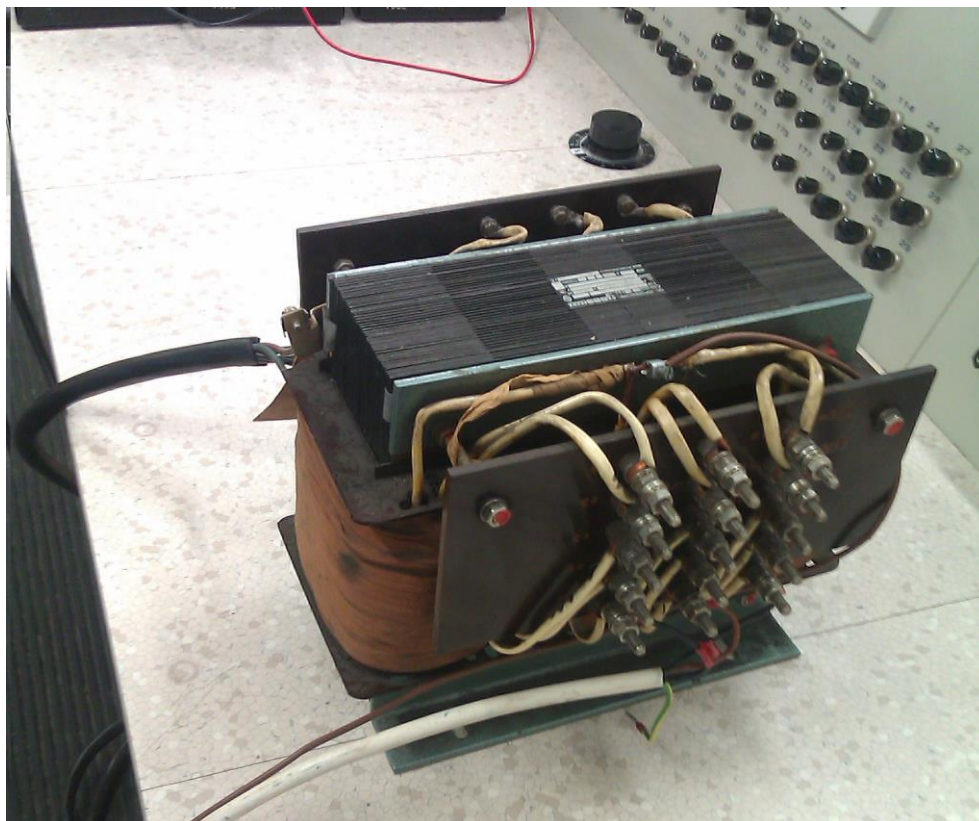
Při měření nastal jediný významnější problém a to, že měřený transformátor měl vyvedenou nulu pouze na sekundárním vinutí. Na transformátoru se muselo měřit s prohozenými vinutími a musel se tedy hlídat maximální procházející proud.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 230 s. ISBN 80-7043-509-7.
- [2] PETROV, Georgij N. *Elektrické stroje 1: úvod-transformátory*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1980. 385 s.
- [3] KULKARNI, S. V. a KHAPARDE, S.A. *Transformer engineer: design and practice*. New York: Marcel Dekker, 476 s. Power engineering. ISBN 0-8247-5653-3.
- [4] SÝKOROVÁ, Lucie. *2D and 3D simulations of stray losses in transformer tank and design of shielding*. In: *OWD '2007: IX międzynarodowe warszaty dokroranckie*. Warszawa: PTETIS, 2007. s. 97-102. ISBN 83-922242-2-1.
- [5] Elektrické stroje: Transformátory. [online]. [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: http://www.janoud.cz/sub/jcuele/13_Elektricke_stroje_1.pdf
- [6] Magnetika: Magnetické materiály. In: [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: https://portal.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=80884.
- [7] EMAP prednaska 7.: Magnetické materiály. In: [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: https://portal.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=46138.
- [8] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. 2.vydání. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2004. 222 s. ISBN 80-7043-332-9.
- [9] KOPYLOV, Igor Petrovič aj. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 685 s.
- [10] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958. 714 s.
- [11] KRALJ, Lenart a Damijan MILJAVEC. *Stray losses in power transformer tank walls and construction parts*. [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.cedrat.com/fileadmin/user_upload/cedrat_groupe/Publications/Publications/2010/09/2010_Stray_losses_in_power_transformer_tank_walls_and_construction_parts_Miljavec_Kralj_Univ_Ljubljana_ICEM.pdf
- [12] HRUŠKA, Karel. ZČU. Podklady k výuce předmětu: Stavba elektrických strojů 2: Konstrukce elektrických strojů.
- [13] TŮMOVÁ, O., ČTVRTNÍK, V., GIRG, J., ŠVARNÝ, J. *Elektrická měření : měřicí metody*. Plzeň : Západočeská univerzita, 2005, 218 s. ISBN: 80-7043-412-0
- [14] LIST, Vladimír. *Elektrotechnika III: elektrické přístroje*. 2. přeprac. vyd. Praha, 1963. 683 s. Technický průvodce 15.
- [15] MĚŘIČKA, Jiří, HAMATA, Václav a VOŽENÍLEK, Petr. *Elektrické stroje*. Vyd. 2, dotisk. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. 311 s. ISBN 80-01-02109-2
- [16] LOPEZ-FERNANDEZ, Bulent ERTAN a Janusz TUROWSKI. *Transformers: Analysis, Design, and Measurement* [online]. CRC Press, 2013 [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: http://books.google.cz/books?id=TU51uN8n1z4C&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- [17] Dr. OLIVARES-GALVAN, Juan. *Reduction of Losses in Distribution Transformers: Reduction of core losses*. IEEE. [online]. Athény, Řecko: Universidad Autonoma Metropolitana, 2010, 4.11 [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/greece/index_files/files/study%20of%20loss%20reduction%20in%20DT.p

Přílohy

Příloha A – Transformátor bez a s nádobou



Příloha B – Zátěž a zapojení měření

