

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Návrh výkonového transformátoru**

**vedoucí práce: Ing. Michaela Vachtlová**  
**autor: Václav Nováček**

**2012**

## **Anotace**

Předkládaná bakalářská práce popisuje stav v oblasti výkonových transformátorů. Jejich konstrukci s využívanými materiály. Jejich obvyklé hodnoty podle norem. Stav pro zapojení více transformátorů paralelně. Celkový návrh určeného výkonového transformátoru.

## **Klíčová slova**

Třífázový transformátor, jednofázový transformátor, výkonový transformátor, vinutí, magnetický obvod

## **Abstract**

The last chapter describes a condition in power transformers. Their design used by the materials. The normal value according to standards. Status of the involvement of several transformers in parallel. The overall design of the specified power transformer.

## **Key words**

Three-phase transformers, single-phase transformer, power transformer, windings, magnetic circuit

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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.

V Plzni dne 30.5.2012

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucí bakalářské práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>6</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>7</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ</b> .....	<b>8</b>
<b>1 TRANSFORMÁTOR – TEORETICKÝ ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
1.1 ROZDĚLENÍ TRANSFORMÁTORŮ:.....	10
1.2 CHLAZENÍ TRANSFORMÁTORŮ.....	10
<i>Druhy chladiv a jejich označení</i> .....	11
<i>Označení způsobu oběhu chladiva</i> .....	11
1.3 PRINCIP ČINNOSTI.....	11
1.4 IDEÁLNÍ TRANSFORMÁTOR .....	13
1.5 PRÁCE TRANSFORMÁTORU .....	13
1.5.1 <i>Chod naprázdno</i> .....	13
1.5.2 <i>Chod nakrátko</i> .....	14
1.6 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU.....	14
1.7 TŘÍFÁZOVÝ TRANSFORMÁTOR .....	15
<b>2 VÝKONOVÉ TRANSFORMÁTORY</b> .....	<b>16</b>
2.1 SKUPINY SPOJENÍ TRANSFORMÁTORŮ.....	16
2.2 PARALELNÍ CHOD TRANSFORMÁTORŮ .....	16
2.3 OBVYKLÉ HODNOTY VÝKONOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ V ČR .....	17
<b>3 KONSTRUKCE VÝKONOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ</b> .....	<b>18</b>
3.1 VINUTÍ TRANSFORMÁTORU.....	18
3.1.1 <i>Konstrukce vinutí</i> .....	18
3.1.2 <i>Materiály pro vinutí</i> .....	20
3.2 MAGNETICKÝ OBVOD TRANSFORMÁTORU .....	21
3.2.1 <i>Konstrukce magnetického obvodu</i> .....	21
3.2.2 <i>Materiály magnetického obvodu</i> .....	22
3.3 OSTATNÍ KONSTRUKČNÍ PRVKY TRANSFORMÁTORU .....	22
3.3.1 <i>Konstrukce</i> .....	23
<b>4 NÁVRH TRANSFORMÁTORU</b> .....	<b>23</b>
4.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY .....	23
4.2 ROZMĚRY VINUTÍ.....	24
4.3 CELKOVÉ ROZMĚRY.....	25
4.4 ZTRÁTY TRANSFORMÁTORU .....	25
4.5 NAPĚTÍ NAKRÁTKO .....	27
4.6 TEPELNÝ VÝPOČET .....	28
4.7 VLIV RŮZNÝCH PROVEDENÍ VINUTÍ NA ZTRÁTY NAKRÁTKO .....	30
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>31</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>32</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>32</b>

## Úvod

Předkládaná práce popisuje obvyklé konstrukce a používané materiály v oblasti výkonových transformátorů, včetně návrhu konkrétního výkonového transformátoru.

Text je rozdělen do čtyř částí, kde první část se zabývá teoretickým rozbořem práce transformátorů. Druhá část popisuje současný stav v oblasti distribučních transformátorů, třetí uvádí nejběžnější používané konstrukce a materiály těchto transformátorů. Ve čtvrté části je uveden příklad výpočtu návrhu distribučního transformátoru.

V příloze je pak nakreslena sestava stroje s uvedením obvyklého vybavení transformátoru.

## Seznam symbolů

$L1, L2, L3$	Fázové vodiče napájecí soustavy
$1f, 3f$	Počet fází
$M$	Moment motoru bez pomocné fáze
$M_R$	Moment motoru s pomocnou odporovou fází
$M_C$	Moment motoru s rozběhovým kondenzátorem
$d\vec{S}$	Element plochy statoru
$d\vec{B}$	Element magnetické indukce
$\Phi$	Magnetický tok
$I_p$	Primární proud transformátoru
$I_s$	Sekundární proud transformátoru
$U_p$	Primární napětí transformátoru
$U_s$	Sekundární napětí transformátoru
$H$	Intenzita magnetického pole
$N$	Počet závitů
$p$	Převod transformátoru
$f$	Frekvence
$\rho$	Elektrická vodivost
$\mu$	Permeabilita
$J$	Proudová hustota
$S$	Průřez jádra
$D_j$	Průměr jádra transformátoru
$k_p$	Činitel zaplnění
$S_s$	Skutečný průřez skládaných plechů
$D_s$	Střední průměr vinutí
$S_v$	Průřez vodiče
$m$	Hmotnost
$S_j$	Průřez jádra
$l_j$	Délka jádra
$l_s$	Délka spojky
$k$	Koeficient, který zohledňuje vliv mechanického opracování
$a_1$	Šířka prvního vinutí
$a_2$	Šířka druhého vinutí
$l_v$	Výška vinutí
$P_k$	Ztráty nakrátko
$l_n$	Střední obvod obou vinutí



K	Měrný tepelný proud
P0	Ztráty naprázdno

## Transformátor – teoretický úvod

**Transformátor** je elektrický netočivý stroj, který umožňuje přenášet elektrickou energii z jednoho obvodu do jiného pomocí vzájemné elektromagnetické indukce při zachování hodnoty výkonu. Provádění transformace je bez mechanického pohybu proto netočivý stroj. Používá se většinou pro přeměnu střídavého napětí (např. z vysokého napětí na nízké nebo obráceně) nebo pro galvanické oddělení obvodů. Důvodem použití je zvýšení hospodárnosti při přenosu elektrické energie na větší vzdálenost. [1,4]

### 1.1 Rozdělení transformátorů:

Podle počtu fází:

- Jednofázový
- Třífázový
- Speciální (dvě nebo více fází, měniče počtu fází)

Podle konstrukce magnetického obvodu:

- Plášťový
- Jádrový
- Toroidní

Podle použití:

- Energetické: blokový (generátor elektrárny na vedení vvn), distribuční (z vedení vvn/vn ke spotřebitelům)
- Napájecí (pro transformaci napětí nn na malé napětí)
- Bezpečnostní (jako napájecí, ale zajištěná izolační pevnost - pro napájení obvodů ve zdravotnictví, hraček a spotřebičů ve třídě III)
- Rozptylový (s magnetickým bočником, pro svařování, napájení výbojek a speciální aplikace)
- Regulační (autotransformátory, ferorezonanční stabilizátory,...)
- Měřicí (napěťové, proudové, kombinované)

Podle počtu vinutí:

- Dvojvinutový
- Trojvinutový
- Vícevinutový [1,4]

### 1.2 Chlazení transformátorů

Malé transformátory jsou obvykle chlazeny vzduchem. Velké transformátory jsou obvykle chlazeny olejem. Nové transformátory jsou vyráběny jako bezolejové. Jejich vinutí je zalito v

izolační pryskyřici. Přímé vodní chlazení se nepoužívá. Voda je i při nepatrném znečištění vodivá a elektrickým proudem je rozkládána na výbušnou směs vodíku a kyslíku.

#### *Druhy chladiv a jejich označení*

- O - oleje
- A - vzduch
- W - voda
- L - nehořlavá izolační kapalina
- G - plyn
- S - pevný izolant

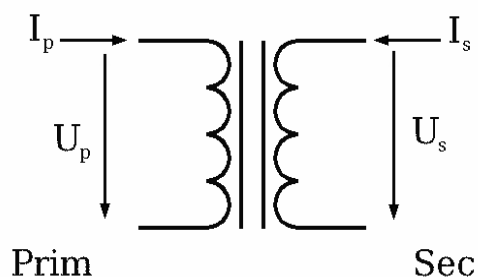
#### *Označení způsobu oběhu chladiva*

- N - přirozený
- F - nucený neřízený
- D - nucený řízený

[1,4]

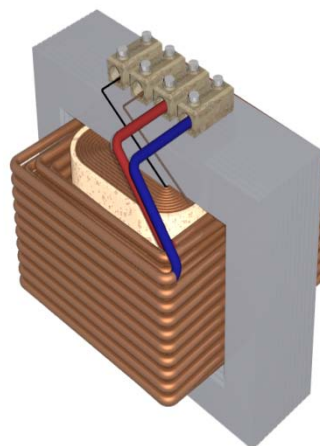
### 1.3 Princip činnosti

Transformátor je měnič střídavého proudu. Skládá se ze tří hlavních částí: vinutí, magnetický obvod, izolační systém.



Obrázek 2 : Náhradní schéma [4]

Primární vinutí slouží k převodu elektrické energie na magnetickou.

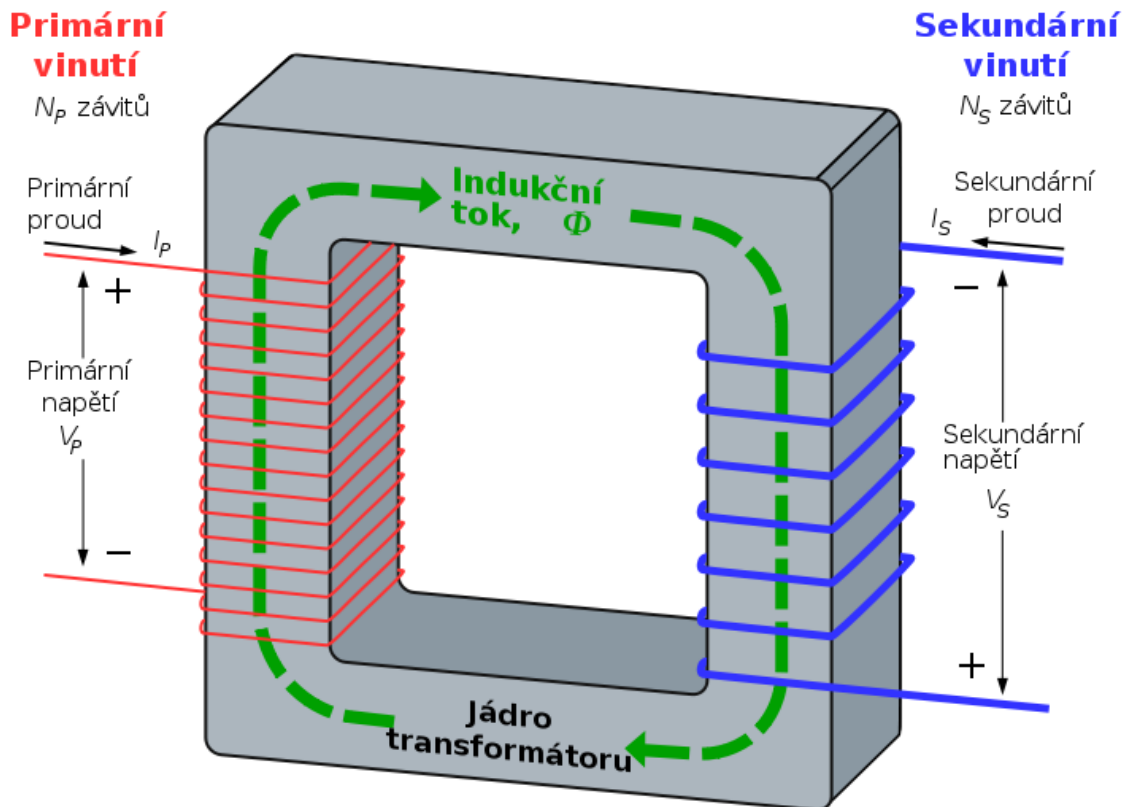


Procházejícím proudem se vytváří magnetický **Obrázek 1 : Ilustrace transformátoru [4]**

tok  $\Phi$ . Tento tok je veden magnetickým obvodem (jádrem) k sekundární cívce. Účelem magnetického obvodu většiny transformátorů je zajistit, aby co nejvíce magnetických siločar procházelo zároveň primární a sekundární cívkou.

V sekundární cívce se podle principu Faradayova indukčního zákona indukuje elektrické napětí. Proto transformátor pracuje jen na střídavý nebo pulsující proud, protože u

stejnoseměrného proudu se nemění magnetický tok:



Obrázek 3 : Znázornění magnetického toku [4]

Můžeme odvodit z Maxwellových rovnic:

$$\oint_c \vec{H} d\vec{l} = \sum I + \frac{d\Psi}{dt} \text{ - zákon celkového proudu}$$

$$\oint_c \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d\Phi_c}{dt} \text{ - Faradayův indukční zákon}$$

Zákon celkového proudu znázorňuje nám souvislost mezi protékajícím proudem a intenzitou magnetického pole. Prvek  $\frac{d\Psi}{dt}$ , (tzv. posuvný proud (projevuje se při vyšších frekvencích než 50Hz) je možné zanedbat. Protéká-li vinutím cívky střídavý proud, vzniká v okolí vodiče intenzita magnetického pole. Protože platí  $\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$ , vzniká zde i magnetická indukce. Hodnota  $\mu$  je permeabilita a je dána vztahem  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ . Kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua ( $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  H/m) a  $\mu_r$  je tzv. relativní permeabilita a je to poměr materiálu k  $\mu_0$ . Pro magnetický tok platí  $\int_s \vec{B} d\vec{S} = \Phi$ . Z druhé rovnice můžeme určit indukované napětí

$u_i = -\frac{d\Phi_c}{dt}$ , kde  $\Phi_c$  je celkový magnetický tok a platí  $\Phi_c = N \cdot \Phi$ . Pro magnetický tok můžeme psát  $\Phi(t) = \Phi_m \cdot \sin(\omega t)$ . Pokud derivujeme rovnici podle času, dostáváme rovnici  $u_i = N \cdot \omega \cdot \Phi_m \cdot \cos(\omega t)$ . Poté použijeme efektivní hodnotu indukovaného napětí, tak nám vychází:  $U_i = \frac{1}{\sqrt{2}} N \cdot \omega \cdot \Phi_m$ . Do této rovnice dosadíme za úhlovou rychlost  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  a poté nám vychází  $U_i = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_m$  kde  $\frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}}$  se vyjádří jako 4,44. Z toho nám vyjde vztah  $U_i = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot \Phi_m$ . [1,4]

## 1.4 Ideální transformátor

U ideálního transformátoru bereme v potaz, že odpory vinutí jsou nulové a velikost relativní permeability jádra  $\mu_r$  je nekonečně velká. Potom z indukčního zákona platí:

$$u_1 = -N_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} \quad \text{a} \quad u_2 = -N_2 \cdot \frac{d\Phi_2}{dt}$$

Po dalších úpravách dostaneme vztah pro převod transformátoru:

$$p = \frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

Když máme  $p > 1$  jedná se o snižující transformátor (sekundární vinutí má nižší napětí než primární), pokud máme  $p < 1$  hovoříme jako o zvyšujícím transformátoru (na primární straně nižší napětí než sekundární).

$U_1$  je napětí na primární straně cívky,  $i_1$  je proud na primární straně cívky,  $N_1$  je počet závitů na primární straně cívky. Indexem 2 jsou značeny veličiny na sekundární straně cívky. [1,4]

## 1.5 Práce transformátoru

Ze dvou mezních situací lze odvodit parametry transformátoru a jeho chování v síti při běžných podmínkách. Jedná se o stav naprázdno (výstup je nezátížen) a stav nakrátko (výstupní impedance se blíží nekonečnu). [1,4]

### 1.5.1 Chod naprázdno

Výstupní proud  $I_2 = 0$  A, proto lze rovnice uvedené v kap. 1.6 upravit:

$$\overline{U}_1 = R_1 \cdot \overline{I}_1 + jX_{l\sigma} \cdot \overline{I}_1 + jX_\mu \cdot \overline{I}_1$$

$$\overline{U}_2 = jX_\mu \cdot \overline{I}_1$$

Proud  $I_{10}$  se nazývá proudem naprázdno a v rovnici je uveden jako proud  $I_1$ . Proud  $I_{10}$  obvykle dosahuje hodnot od 1 do 10 % z  $I_n$  (jmenovitý proud) a zobrazuje se v % -

$i_{10} = \frac{I_{10}}{I_N} \cdot 100$ . Kvalita magnetického obvodu je určena právě ze ztrát naprázdno. Pro ně platí:

$\Delta P_0 = (R_1 + R_{Fe}) \cdot I_{10}^2$ . Víme, že hodnotu  $R_{Fe} \gg R_1$  tedy lze s dostatečnou přesností uvádět:

$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} = R_{Fe} \cdot I_{10}^2$ . Měření naprázdno se provádí pro určení hodnot  $I_{10}$  a  $\Delta P_0$ . To

znamená, že výstupní svorky jsou nezapojeny. Při měření také měříme hodnotu vstupního proudu a výkonu a vstupní napětí zvyšujeme až do hodnoty 1,15 násobku jmenovité hodnoty napětí. [1]

### 1.5.2 Chod nakrátko

Výstupní napětí  $U_2 = 0$  V, a rovnice uvedené v kap. 1.6 lze upravit:

$$\overline{U}_1 = R_1 \cdot \overline{I}_1 + jX_{1\delta} \cdot \overline{I}_1 + jX_\mu \cdot (\overline{I}_1 + \overline{I}_2)$$

$$0 = R_2 \cdot \overline{I}_2 + jX_{2\delta} \cdot \overline{I}_2 + jX_\mu \cdot (\overline{I}_1 + \overline{I}_2)$$

Můžeme zanedbat hodnotu proudu  $I_0$ , protože hodnota  $R_{Fe} \gg R_2$ . Nyní můžeme říci, že  $I_1 = I_2'$ . Proud  $I_2'$  se nazývá proud nakrátko a značí se  $I_k$ . Další veličinou je napětí nakrátko značí se  $U_k$ . Toto napětí musí být připojeno na vstup transformátoru, aby cívkami protékaly jmenovité proudy. Nabývá, u běžných transformátorů, hodnot okolo 4 – 10% a zobrazuje se

také v procentech ze vztahu  $u_k = \frac{U_k}{U_N} \cdot 100$ . Ztráty nakrátko vyjadřují především ztráty ve

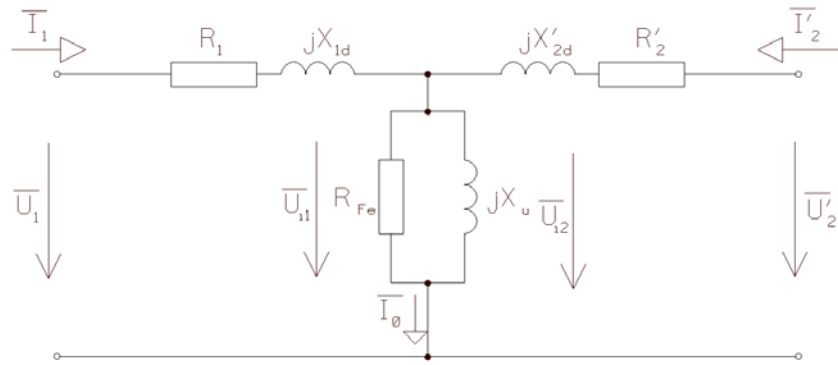
vinutí, dále pak přídatné ztráty (indukce v oleji, konstrukci...). Z měření můžeme určit hodnoty  $u_k$  a  $\Delta P_k$ . Toto měření se provádí tak, že výstupní svorky spojíme nakrátko. Vstupní napětí se postupně zvyšuje až do hodnoty, než je vstupní proud roven jmenovitému. Zase

měříme vstupní proud a výkon. Hodnota  $u_k$  se určí ze vztahu  $u_k = \frac{U_{kN}}{U_N} \cdot 100$ , kde  $U_{kN}$  je

hodnota napětí, při kterém obvodem protéká jmenovitý proud. [1]

### 1.6 Náhradní schéma transformátoru

Na sestavení rovnic pro jednofázový transformátor je přijatelné vytvořit náhradní schéma (obr.1). Náhradní schéma se nejvíce používá při zjednodušených předpokladech například ustálený stav, harmonické veličiny proudu a napětí.



Obrázek 4: Náhradní schéma transformátoru [1]

Uvažujeme, že primární vinutí transformátoru je označeno indexy 1 a sekundární je označeno 2. Primární i sekundární vinutí jsou v náhradním schématu elektricky propojena. Ve skutečnosti jsou vzájemně izolována. Při běžných pracovních podmínkách je možné toto náhradní schéma použít na výpočet proudů a napětí. Sekundární stranu musíme přepočítat na primární dle:  $U'_2 = k \cdot U_2$ ,  $I'_2 = \frac{1}{k} \cdot I_2$ ,  $Z'_2 = R'_2 + jX'_2 = k^2 \cdot Z_2$ . Kde hodnota  $k$  je převod transformátoru. Hodnoty  $R_1$  a  $R'_2$  určují rezistenci vodičů jednotlivých cívek vinutí, hodnoty reaktancí  $X_{1\delta}$  a  $X'_{2\delta}$  indukují indukčnost těchto cívek ( $X = \omega \cdot L$ ). Ztráty v železe transformátoru jsou reprezentovány rezistorem  $R_{Fe}$  v příčné větvi, a v příčné větvi se také nachází reaktance  $X_\mu$ , která vyjadřuje vzájemnou indukčnost obou vinutí.

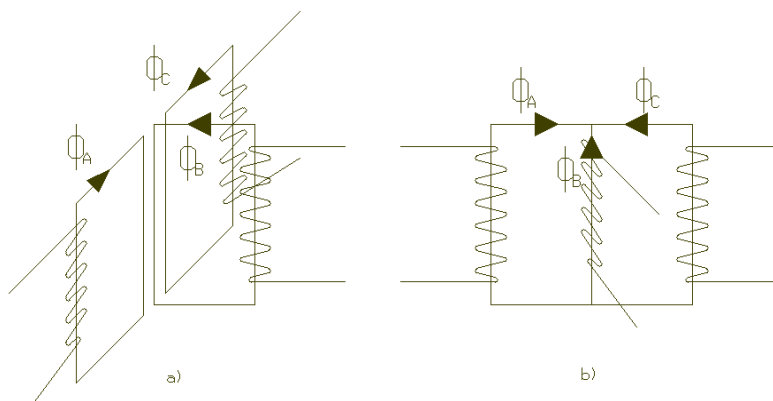
Rovnice transformátoru lze sestavit z Kirchhoffových zákonů:

$$\begin{aligned} \overline{U}_1 &= R_1 \cdot \overline{I}_1 + jX_{1\delta} \cdot \overline{I}_1 + jX_\mu \cdot (\overline{I}_1 + \overline{I}_2) \\ \overline{U}_2 &= R_2 \cdot \overline{I}_2 + jX_{2\delta} \cdot \overline{I}_2 + jX_\mu \cdot (\overline{I}_1 + \overline{I}_2) \end{aligned} \quad [1,4]$$

## 1.7 Třífázový transformátor

V třífázových sítích se používají dva typy transformace. Jedna je samostatná transformace každé fáze (méně využívaná), druhá spočívá ve využití společného magnetického obvodu (jádra) pro všechny tři fáze.

Princip je naznačen na obr. 2. V třífázové soustavě platí, že  $\vec{\Phi}_A + \vec{\Phi}_B + \vec{\Phi}_C = 0$ , tudíž můžeme ze situace a) odstranit jednotlivá jádra tří vinutí a nahradit je situací b), kde použijeme jedno společné jádro pro všechna tři vinutí. [1,4]



Obrázek 5: Princip třífázového magnetického obvodu [1]

## 2 Výkonové transformátory

Název výkonové transformátory se používá jako pojem pro transformátory, protože v energetice se využívá mnoho napěťových úrovní. Výkonové transformátory se používají k transformaci vysokého napětí z distribuční sítě (vysokého napětí) na nízké napětí.[1,4]

### 2.1 Skupiny spojení transformátorů

Aby bylo možné instalovat transformátory do distribuční sítě, musíme znát parametry fázového posunu výstupního napětí ke vstupnímu napětí a skupinu spojení transformátorů. Skupiny spojení transformátorů se značí pomocí dvou písmen. První písmeno, které se značí jako velké, značí zapojení primárního vinutí. Druhé písmeno, které se značí jako malé, platí pro sekundární vinutí. Fázový posun se neuvádí a místo něho a se uvádí tzv. „hodinové číslo“. Hodinové číslo, které vynásobíme číslem 30, uvádí právě fázový posun. Pro názornost uvádím příklad značení: Dd2 – primární vinutí zapojené do trojúhelníka, sekundární také do trojúhelníka, fázový posuv  $60^\circ$ , Yy4 – primární i sekundární vinutí zapojené do hvězdy, fázový posuv  $120^\circ$ . Maximální počet skupin spojení může být tedy až 12 (značeny jsou od 0 do 11). Sudé skupiny tvoří spojení Yy, Dd, Dz, oproti tomu liché Yd, Dy, Yz. Tyto parametry by bylo dobré dodržovat stejné z důvodu paralelní spolupráce transformátorů.[1,4]

### 2.2 Paralelní chod transformátorů

Když spojíme dva a více transformátory paralelně, tak dochází k rozdělení zatížení mezi ně. Jestliže by nebyly splněny stejné (nebo podobné) parametry transformátorů, bude mezi nimi procházet vyrovnávací proud. Je na místě dodržovat tyto podmínky:

- 1) stejný sled fází



- 2) stejné hodinové číslo
- 3) stejný převod a jmenovitá napětí
- 4) stejné napětí nakrátko
- 5) poměr jmenovitých výkonů menší než 3,2:1

První podmínka musí být splněna, aby nedošlo k mezifázovému zkratu. Druhou podmínku je možné upravit pomocí zapojení, která vychází z pravidla, že pokud se změní pořadí fází, mění se výsledný fázový posuv napětí. Tato úprava je možná u skupin 0-4-8, 6-10-2, 11-3-7 a 5-9-1. Například dva transformátory Yd6 a Yd10 lze provozovat paralelně po zapojení sekundárních svorek druhého transformátoru místo pořadí a-b-c jako b-c-a. Třetí podmínka se nemusí dodržet v případě, kdy rozdíl v poměru převodů je menší než několik desetin procent. Pokud tomu tak je, tak mezi transformátory prochází trvalý vyrovnávací proud, který lze vyjádřit jako:

$$I_v = \frac{100 \cdot pr\%}{u_{k1} + u_{k2}} \quad [\%]$$
 Kde  $pr\%$  je rozdíl v převodových poměrech v %. Velikost  $I_v$  je v procentech k jmenovitému výkonu. Další je přípustný rozdíl napětí nakrátko do 10%. To platí u čtvrté podmínky, ale nevýhoda je ta, že způsobuje

nerovnoměrné zatížení transformátorů: 
$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{\frac{S_{n1}}{u_{k1}}}{\frac{S_{n2}}{u_{k2}}}$$
 Z rovnice vidíme, že nejvíce je zatížen transformátor s nejnižším  $u_k$ . Pátá i čtvrtá podmínka se může krátkodobě porušit při přepojování zátěže.[1,4]

### 2.3 Obvyklé hodnoty výkonových transformátorů v ČR

Vychází z normy ČSN EN 50464-1. Tato norma zahrnuje požadavky na transformátory od 50 kVA do 2 500 kVA určené pro provoz v třífázových distribučních sítích, pro nepřetržitý provoz ve vnitřním i venkovním prostředí pro síťový kmitočet 50 Hz, ponořené do minerálního oleje s přirozeným chlazením se dvěma vinutími, vysokonapěťovým s nejvyšším napětím pro zařízení od 3,6 kV do 36 kV, a nízkonapěťovým vinutím, s nejvyšším napětím pro zařízení nepřekračujícím 1,1 kV. Tato norma se týká mj. požadavků na jmenovitá napětí vinutí, odboček a zapojení, dimenzování nulového bodu a impedance nakrátko. V normě jsou uvedeny tabulky ztrát a hladin hluku nakrátko a naprázdno. Zmíněny jsou požadavky na výrobní kusové, typové a zvláštní zkoušky a požadavky na konstrukci a příslušenství. Norma uvádí v kapitole „Účinnost a napěťový pokles“ vzorce pro vyhodnocení účinnosti a výpočet úbytku napětí. V distribuční soustavě ČR se nejvíce využívá napěťová hladina 22 kV, dále 35 kV (sever a východ Čech) a v menší míře 10 kV. [4]

### 3 Konstrukce výkonových transformátorů

Konstrukce výkonových transformátorů a používané materiály lze rozdělit do tří hlavních skupin:

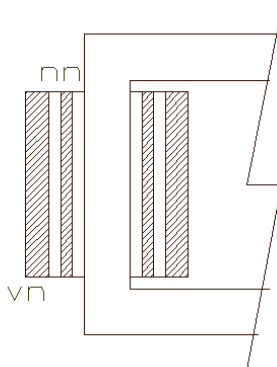
- *Konstrukce a materiály vinutí*
- *Konstrukce a materiály magnetického obvodu*
- *Ostatní konstrukční prvky a materiály transformátorů*

#### 3.1 Vinutí transformátoru

Pro konstrukci vinutí transformátorů musíme splňovat více požadavků. Například výborná vodivost vodiče, mechanická pevnost konstrukce, elektrická pevnost izolace a odolnost vůči tepelnému namáhání. Proti těmto požadavkům stojí ekonomičnost výroby a proveditelnost.[3,4]

##### 3.1.1 Konstrukce vinutí

Nejběžnější konstrukce vinutí, které se vyrábí u distribučních transformátorů je jednoduché sousé vinutí (obr. 3).



Obrázek 6: Jednoduché sousé vinutí [1]

Další varianty výroby jsou sousé dvojité vinutí, nebo prostřídaná vinutí. Podle velikosti procházejícího proudu, má vliv na průřez vodiče, se liší vinutí jednotlivých cívek. Podle toho je můžeme vhodně rozdělit na konstrukce cívky vn (menší průřez, více závitů) a cívky nn (větší průřez, méně závitů).

Cívky vn jsou obvykle navinuty z kruhového vodiče do mnohvrstevných vinutí (obr. 4).



Obrázek 7: Ukázka mnohovrstvé cívky [5]

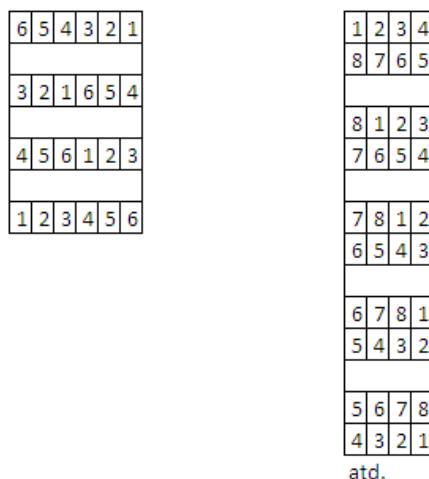
Takové cívky jsou vinuty buď v celku, nebo častěji z několika mnohovrstvých cívek složených v sérii za sebou.

Cívky mn jsou nejčastěji konstruovány z tenkých fólií, příklad je uveden na obr. 5.



Obrázek 8: Ukázka vinutí z hliníkové fólie [5]

Další možností pro výrobu transformátorů je využití více paralelních vodičů nejčastěji obdélníkového tvaru. Vodiče obdélníkového tvaru jsou navinuty do jednochodé nebo vícechodé šroubovice. Vhodné je provádět prostřídání (transpozice) pro rovnoměrné rozložení proudu v jednotlivém vodiči. Transpozice se musí dělat tak, aby jednotlivé vodiče prošly všemi polohami cívk. Toto je zobrazeno na obr. 6. Kde nejdříve je znázorněno v jednochodé a potom v dvouchodé šroubovice.[3,4,5]



Obrázek 9: Příklad prostřídání vodičů [2]

### 3.1.2 Materiály pro vinutí

Nejpoužívanějším materiálem pro vodiče, který se využívá, je měď. Měď má výbornou elektrickou vodivost  $\rho = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ , je dobře tvárná a ekonomicky dostupná. Také se používá z důvodu, že se dobře pájí. Dalším materiálem, který se již méně používá, je hliník. Jeho vlastnosti jsou, že se dobře tváří za tepla i studena, avšak má horší elektrickou vodivost  $\rho = 2,63 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ , než měď. Také má nižší pevnost a hůře se pájí a svařuje.

Izolaci můžeme rozdělit podle použití na izolaci závitovou a polohovou. Zabránění zkratu mezi jednotlivými závity vinutí slouží závitová izolace. Využívají se také izolační laky na bázi pryskyřice nebo smalty nejčastěji pro kruhové vodiče nebo obdélníkové. Dalšími vodiči jsou tzv. fóliové vodiče, u nichž se využívá impregnovaná skelná tkanina nebo impregnovaná celulóza pro závitovou izolaci.

Izolace mezi vinutími nebo jednotlivými cívkami u mnohvrstevných cívek se nazývá polohová. Pro polohovou izolaci se nejčastěji používá impregnovaná celulóza nebo skelná tkanina. Další izolace, která se využívá, je transformátorový olej. Především má za úkol odvést přebytečné teplo. Tudíž je brán důraz na jeho parametry, jako je viskozita a teplotní závislost. Parametry nesmí klesnout ani při nejnižších teplotách. Jako další druh izolace se používá například vzduch.[3,4]

## 3.2 Magnetický obvod transformátoru

Pro magnetické obvody transformátorů využíváme rozdělení na jádrové, plášťové a toroidní. Transformátorové plechy tvoří magnetický obvod u plášťových. Tyto plechy prochází středem vinutí a celé ho objímají. Vytváří tzv. plášť vinutí proto plášťové. Pro jádrové se také používají plechy. Tyto plechy prochází středem vinutí a jsou jejich středy spojené spojkou. Pro distribuční transformátory se používají jádrové.[3,4]

### 3.2.1 Konstrukce magnetického obvodu

U distribučních transformátorů se výhradně používá jádrový magnetický obvod (obr. 7).

Magneticky orientované plechy skládají jádra. Pomocí technologie, jakou jsou vyráběny magnetické obvody, se dělí na magnetické obvody s tupým stykem a přeplátované. Magnetické obvody vyráběny s tupým stykem mají skládaná jádra a spojky samostatně. Ty jsou následně spojeny do jednoho obvodu pomocí svorníků. U distribučních transformátorů se tento způsob nevyužívá z důvodu větších vířících proudů a tím i větší ztráty. Přeplátovaný magnetický obvod se vyrobí způsobem, že se celý obvod skládá současně, následně se vyjme horní spojka a na jádra se umístí vinutí. Po umístění vinutí se plechy vrchní spojky umístí zpět (obr. 7).



Obrázek 10: Ukázka kompletace vrchního dílu spojky jádrového magnetického obvodu [5]

Variabilní je i způsob skládání plechů. V podstatě se používá výhradně způsob skládání plechů se šikmým stykem (tzv. STEP – LAP systém skládání). Mohli bychom mluvit o přesném kruhovém průřezu při skládání magnetických obvodů, avšak to není možné. Proto při výpočtu průřezu udáváme tzv. koeficient zaplnění (viz. kapitola 4.1). Tato hodnota dosahuje rozmezí od 0,7 – 0,95 a závisí na velikosti jádra a způsobu stažení). Pro koeficient zaplnění hraje také roli i cena. Bandáže z plastů se využívají pro stažení jádra. Celé jádro je poté vsazeno mezi stahovací traverzy (obr. 8).[3,4,5]



Obrázek 11: Uložení magnetického obvodu [5]

### 3.2.2 Materiály magnetického obvodu

Transformátorové plechy tvoří základní materiál magnetického obvodu. Plechy jsou vyráběny ze slitiny železa s křemíkem. Čisté železo by se dalo také využít, má lepší magnetické vlastnosti, ale je velmi drahé. Není tedy možné jeho široké rozšíření. Proto se v praxi využívá přísad, které vytváří s nečistotami stabilní sloučeniny a dostáváme určité slitiny. Nejvíce přispívá křemík, protože zvyšuje odpor železa (snížení ztrát vířivými proudy), permeabilitu a zároveň snižuje hodnotu koercitivity  $H_c$  (snížení hysterezních ztrát). Pokud však dosáhneme vyššího obsahu křemíku, zhoršují se mechanické vlastnosti železa (větší křehkost a tvrdost). Obsah křemíku ve slitinách u transformátorů se využívá asi 3%. Výroba magneticky orientovaných plechů je spojena s víceúrovňovým tepelným zpracováním. Izolace povrchů se izoluje pomocí oxidů, fosfátů nebo plastů. Znamená to za studena válcované tenké plechy (0,23 – 0,35 mm). Směr válcování určuje i směr snadné magnetizace materiálu. V dnešní době se používá laser pro úpravy povrchu materiálu.

Dalším materiálem, který se využívá pro magnetická jádra, jsou tzv. amorfní plechy. Jsou to magnetická kovová skla, která se vykazují několikanásobně vyšším odporem, vysokou mechanickou pevností a jsou odolná vůči nečistotám. Trpí i nevýhodou ve větší citlivosti na tepelné zatížení. Vytvoří se nekystalická struktura vlivem rychlého ochlazení (více jak  $10^6$  K/s) a přidá se asi 20% příměsi křemíku. Výroba je v páscech o tloušce 15 -25  $\mu\text{m}$ . [3,4]

### 3.3 Ostatní konstrukční prvky transformátoru

Ostatními konstrukčními prvky myslíme díly pro uchycení, nádoba transformátoru,

průchodky pro vodiče a další součásti (například díly nutné pro umístění či přepravu nebo montáži). [3,4]

### 3.3.1 Konstrukce

Konstrukce nádoby je nejspíše považována nejvýznamnějším prvkem u olejových transformátorů. Nádoba musí splňovat dvě základní funkce: udržení oleje a odvedení přebytečného tepla. U distribučních transformátorů se nejčastěji používá vzduchotěsně uzavřená nádoba z ocelového plechu s vlnitým povrchem. Vlnitý povrch slouží ke zvětšení plochy pro výměnu tepla s okolím. Na víku nádoby jsou provedeny technologické otvory pro průchodky vodičů, měření teploty oleje a pro přepínač odboček. Také zde nalezneme místa pro uchycení transformátoru při montáži. Ve dně nádoby z vnější strany jsou dle přání zákazníka vyrobena pojezdová kolečka, nebo je zde pouze plocha, která umožňuje uchycení transformátoru na stanoviště. Porcelánové izolátory se především používají jako průchodky pro vodiče, nebo se využívají, ale již méně než plastové. Jmenovité napětí vodiče určuje vzdálenosti a rozměry.

U vzduchem chlazených transformátorů není nádoba zapotřebí. Proto jsou vinutí pouze připevněna ke konstrukci z ocelových nosníků. Průchodky jsou součástí izolace zalévaných cívek. [3,4]

## 4 Návrh transformátoru

Tato kapitola se zabývá příkladem výpočtu transformátoru 1MVA  $35 \pm 2 \times 2,5\% / 0,4$  kV,  $Yd1$ ,  $u_k = 6\%$ .

### 4.1 Základní parametry

Nejprve je vhodné určit základní elektrické parametry primárního a sekundárního vinutí.

Primární vinutí:

Zapojení do hvězdy

$U_n = 35\,000$  V. Určení regulačních mezí:

Tab. 1 Hodnoty napětí primární strany

Procentní hodnota	-5%	-2,5%	0	+2,5%	+5%
$U$ [V]	33250	34125	35000	35875	36750

Těmto hodnotám napětí přísluší patřičný proud. Pro výpočet je důležitá největší hodnota proudu. Ta je určena ze vztahu:  $I = 1/3 S_n / U_x \sqrt{3} = 17,36$  A. Z této hodnoty lze navrhnout vodič

vinutí. Vychází se z možné hodnoty proudové hustoty pro olejové transformátory. Pro měděný vodič se pohybuje v mezích od 2 do 4,5 A/mm<sup>2</sup>. Pro tento návrh bude použita hodnota  $J = 3 \text{ A/mm}^2$ . Ze vzorce  $J = I/S$  je možné určit průřez použitého vodiče  $S_1 = I/J = 17,36/3 = 5,8 \text{ mm}^2$ . Nejbližší hodnota průřezu kruhového vodiče je  $6 \text{ mm}^2$ .

Sekundární vinutí:

Zapojení do trojúhelníka

$U_n = 400 \text{ V}$ . Při zapojení do trojúhelníka je na jedné cívce hodnota napětí  $4.1.3 U = U_n/\sqrt{3} = 231 \text{ V}$ . Hodnota protékajícího proudu je potom  $I = 1/3S/U = 1443,6 \text{ A}$ . Při zvolení  $J = 3 \text{ A/mm}^2$  je potom průřez vinutí  $S_2 = 481 \text{ mm}^2$ . Zde je vhodné zvolit obdélníkový vodič s rozměry 2x10 mm. Jeden závit cívky musí být tedy navinut z 24 paralelních vodičů.

Dále je nutné zvolit průměr jádra transformátoru  $D_j$ . Ten se volí dle podobných typů transformátorů. V uvedených literaturách jsou uvedeny vzorce pro přibližné určení průměru jádra. Pro tento návrh  $D_j = 175 \text{ mm}$ .  $S_j$  je plocha kruhu:

$$S_j = \frac{\pi \cdot D_j^2}{4} \cdot k_p = \frac{3,14 \cdot 0,175^2}{4} = 0,0216 \text{ m}^2$$

kde  $k_p$  je tzv. činitel zaplnění a respektuje nedokonalost kružnice u skládaných plechů jádra.

Je definován jako  $k_p = \frac{S_s}{S_I}$ , kde  $S_s$  je skutečný průřez skládaných plechů a  $S_I$  je ideální

průřez kruhu. Hodnota  $k_p$  se pohybuje v mezích od 0,7 do 0,95 dle technologie výroby a její nákladnosti.

Výpočet počtu závitů

$$N_1 = \frac{U}{4,44 \cdot B_j \cdot f \cdot S_j} = \frac{36750}{4,44 \cdot 1,75 \cdot 50 \cdot 0,0216} = 4370 \text{ závitů}$$

$$N_2 = \frac{U_2}{U_1} \cdot N_1 = \frac{230,9}{36750} \cdot 4370 = 28 \text{ závitů [2]}$$

## 4.2 Rozměry vinutí

Primární vinutí

Nyní je nutné určit rozměry vinutí. K tomu je zapotřebí rozdělení primárního vinutí pro možnost regulace napětí. 2,5% z jmenovitého napětí primární strany odpovídá 875 V. Na

jeden závit primárního vinutí připadá napětí:  $U_{1z} = \frac{U_1}{N_1} = \frac{36750}{4370} = 8,4 \text{ V/závit}$ . Proto pro



regulaci napětí je zapotřebí (4 regulační cívky):  $N_{IR} = 4 \cdot \frac{875}{8,4} = 4 \cdot 104 = 416$  závitů. Zbývá 3954 závitů, které lze rozdělit například do 14 cívek. 13 cívek po 299,5 závitů a poslední cívka bude mít 60,5 závitů. Na šířku je navinuto 15 vodičů, na výšku zbývá 20. Mezi regulačními vinutími je 5 mm široká mezera z důvodu chlazení. Ta je také mezi regulačním a hlavním vinutím. Izolace vodičů vinutí je z izolačního laku, přírůstek průměru vodiče je 0,1 mm. Celkové rozměry primárního vinutí budou proto: 43,5x932 mm.

#### Sekundární vinutí

Počet závitů je spočítán na 28.  $U_{2Z} = \frac{U_2}{N_2} = \frac{230,9}{28} = 8,25$  V / závit. Vodič je navržen

obdélníkového průřezu 2x10 mm, závit je navinutý z 24 paralelních vodičů. Izolace vodičů je také z izolačního laku. Výšky vinutí je vhodné dodržet stejné, proto je jeden závit složen z osmi vodičů na šířku a tří vodičů na výšku. Z důvodů rovnoměrného rozložení proudu v paralelních vodičích je nutné tyto vodiče prostřídat. Pro prostřídání je nutné vynechat místo mezi jednotlivými závity, to bude vhodné i z důvodu chlazení vinutí. Mezera šířky 4 mm bude použita 24x (24 paralelních vodičů). Výsledné rozměry jsou tedy 16,8x940,4 mm. [2]

### 4.3 Celkové rozměry

Rozměry vinutí, magn. obvodu a transformátoru + nákres.

Vinutí v mm výška x šířka:

V1 930 x 43,5

V2 942 x 16,8

[2]

### 4.4 Ztráty transformátoru

Výpočet ztrát transformátoru se obvykle provádí z hmotnosti vinutí a magnetického obvodu. Proto je nutné nejprve určit tyto hmotnosti.

Hmotnost měděného vinutí primární strany:

$$m_{1Cu} = N_1 \cdot D_{S1} \cdot \pi \cdot S_V \cdot \gamma_{Cu} = 4370 \cdot 0,292 \cdot 3,14 \cdot 6 \cdot 10^{-6} \cdot 8900 = 214 \text{ kg.}$$

Hmotnost měděného vinutí sekundární strany:

$$m_{2Cu} = N_2 \cdot D_{S2} \cdot \pi \cdot S_V \cdot \gamma_{Cu} = 28 \cdot 0,202 \cdot 3,14 \cdot 480 \cdot 10^{-6} \cdot 8900 = 75,9 \text{ kg.}$$

$D_S$  – střední průměr vinutí [m]

$S_V$  – průřez vodiče [m<sup>2</sup>]

$\gamma_{Cu}$  – měrná hmotnost mědi [kg/m<sup>3</sup>]

Výsledná hmotnost vinutí je:

$$m_{Cu} = 3 \cdot (m_{1Cu} + m_{2Cu}) = 3 \cdot (214 + 75,9) = 869,7 \text{ kg.}$$

Hmotnost magnetického obvodu:

$$m_J = 3 \cdot S_J \cdot l_J \cdot \gamma_{Fe} = 3 \cdot 0,0216 \cdot 1 \cdot 7650 = 496,8 \text{ kg.}$$

$$m_S = 2 \cdot S_S \cdot l_S \cdot \gamma_{Fe} = 2 \cdot 0,0216 \cdot 1,421 \cdot 7650 = 469,6 \text{ kg.}$$

$S_J$  – průřez jádra [m<sup>2</sup>]

$S_S$  – průřez spojky [m<sup>2</sup>]

$l_J$  – délka jádra [m<sup>2</sup>]

$l_S$  – délka spojky [m<sup>2</sup>]

$\gamma_{Fe}$  – měrná hmotnost železa [kg/m<sup>3</sup>]

Výsledná hmotnost magnetického obvodu je:

$$m_{Fe} = m_J + m_S = 496,8 + 469,6 = 966,4 \text{ kg.}$$

Výpočet ztrát naprázdno:

$$B_j = \frac{U_1}{4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot S_j} = \frac{36750}{4,44 \cdot 4370 \cdot 50 \cdot 0,0216} = 1,75 \text{ T}$$

$$P_0 = k_0 \cdot \Delta p_{d0} \cdot m_{Fe} \cdot B_j^2 = 1,1 \cdot 1,2 \cdot 966,4 \cdot 1,75^2 = 3906,7 \text{ W.}$$

$k_0$  – koeficient, který zohledňuje vliv mechanického opracování, zúžení průřezu jádra při stažení, nestejnomyšernost plechů...

$\Delta p_{d0}$  – měrné ztráty plechů při  $B_j = 1 \text{ T}$  (udává výrobce plechů) [W/kg]

Výpočet ztrát nakrátko:

$$P_{kv1} = \frac{\rho_{Cu}}{\gamma_{Cu}} \cdot 3 \cdot m_{1Cu} \cdot J^2 = \frac{21300}{8900} \cdot 3 \cdot 214 \cdot 3^2 = 13809,42 \text{ W.}$$

$$P_{kv2} = \frac{\rho_{Cu}}{\gamma_{Cu}} \cdot 3 \cdot m_{2Cu} \cdot J^2 = \frac{21300}{8900} \cdot 3 \cdot 75,9 \cdot 3^2 = 4897,8 \text{ W.}$$

$$P_{kv} = P_{kv1} + P_{kv2} = 13809,4 + 4897,8 = 18707,2 \text{ W.}$$

Přídavné ztráty ve vinutí:

Tyto ztráty vznikají vířivými proudy, vyvolanými rozdílem napětí mezi krajními částmi vodiče, který prochází různými částmi rozptylového pole. Potlačení těchto ztrát je možné prostřednictvím polohy vodiče v cívce. Obvykle se udává 4-12% ze ztrát nakrátko. V tomto případě například 8%:

$$P_{kp1} = P_{kv} \cdot 0,08 = 18707,2 \cdot 0,08 = 1496,6 \text{ W.}$$

Přídavné ztráty vznikající v nádobě transformátoru:

Ztráty vznikají vířivými proudy, které vznikají působením rozptylového indukčního toku na stěny nádoby. Znatelně se projevují při vyšších výkonech. Jsou nižší než ztráty předchozí:

$$P_{kp2} = P_{kv} \cdot 0,04 = 18707,2 \cdot 0,04 = 748,3 \text{ W.}$$

Celkové ztráty nakrátko jsou:

$$P_k = P_{kv} + P_{kp1} + P_{kp2} = 18707,2 + 1496,6 + 748,3 = 20952 \text{ W.}$$

Celkové ztráty transformátoru jsou:

$$P = P_k + P_0 = 20952 + 3906,7 = 24858,7 \text{ W. [2]}$$

## 4.5 Napětí nakrátko

Napětí nakrátko lze vypočítat ze složky činné (ohmické) a jalové (induktivní). Činná složka se vypočítá ze ztrát nakrátko:

$$u_r = \frac{P_k}{S_n} \cdot 100 = \frac{19860,75}{1 \cdot 10^6} \cdot 100 = 1,986 \text{ \%}.$$

Induktivní složku je obtížnější určit. Závisí na uspořádání, rozměrech a tvaru vinutí. Pro souměrná vinutí se obvykle používá vzorec:

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{8 \cdot f \cdot I_2 \cdot N_2 \cdot l_n \cdot k_r}{l_v \cdot U_z \cdot 10^4} \cdot \left( a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) = \\ &= \frac{8 \cdot 50 \cdot 1443 \cdot 28 \cdot 0,776 \cdot 0,96}{0,936 \cdot 8,2 \cdot 10^4} \cdot \left( 0,015 + \frac{0,0435 + 0,0168}{3} \right) = 5,49 \text{ \%}. \end{aligned}$$

f – frekvence [Hz]

$l_n$  – střední obvod obou vinutí [m]

$k_r$  – činitel (nazývaný Rogowskiho), který upravuje výšku vinutí [-]

$a_1$  – šířka prvního vinutí [m]

$a_2$  – šířka druhého vinutí [m]

$a_{12}$  – vzdálenost mezi vinutími [m]

$l_v$  – výška vinutí [m]

$U_z$  – napětí na jeden závit vinutí [V]

Výsledná hodnota  $u_k$ :

$$4.5.3u_k = \sqrt{u_r^2 + u_x^2} = \sqrt{1,986^2 + 5,49^2} = 5,84 \% . [2]$$

#### 4.6 Tepelný výpočet

Oteplení vinutí:

Vychází se ze ztrát nakrátko a plochy daného vinutí, která se ochlazuje. Pro první vinutí platí:

$$P_{k1} = 13809,42 \text{ W}$$

Výpočet chlazené plochy:

Průměry jednotlivých vertikálních chladících kanálů (228,6 mm je průměr sekundárního vinutí):

$$D_1 = 228,6 + 30 = 259 \text{ mm}$$

$$D_2 = 258,6 + 43,5 = 302 \text{ mm}$$

$$D_3 = 302 + 10 = 312 \text{ mm}$$

$$D_4 = 312 + 43,5 = 355,6 \text{ mm}$$

Jednotlivé plochy jsou tedy:

$$S_1 = \pi \cdot D_1 \cdot l_v = 3,14 \cdot 0,259 \cdot 0,858 = 0,697 \text{ m}^2$$

$$S_2 = \pi \cdot D_2 \cdot l_v = 3,14 \cdot 0,302 \cdot 0,858 = 0,815 \text{ m}^2$$

$$S_3 = \pi \cdot D_3 \cdot l_v = 3,14 \cdot 0,312 \cdot 0,858 = 0,842 \text{ m}^2$$

$$S_4 = \pi \cdot D_4 \cdot l_v = 3,14 \cdot 0,356 \cdot 0,858 = 0,959 \text{ m}^2$$

U horizontálních kanálů je potom plocha:

$$S_5 = 14 \cdot \pi \cdot (r_1^2 - r_2^2) = 14 \cdot 3,14 \cdot (0,18^2 - 0,12^2) = 0,8 \text{ m}^2$$

Celková plocha je součtem všech a je  $S = 4,1 \text{ m}^2$ . Pro tři cívky potom  $S = 12,3 \text{ m}^2$ . Měrný tepelný proud je:

$$K_1 = \frac{P_k}{S_1} = \frac{13809}{12,3} = 1123 \text{ W/m}^2$$

Pro sekundární vinutí stejný výpočet:

$$P_{k2} = 4897,8 \text{ W}$$

Výpočet chlazené plochy:

Průměry jednotlivých vertikálních chladících kanálů:

$$D_1 = 175 + 10 = 185 \text{ mm}$$

$$D_2 = 185 + 16,8 + 10 = 202 \text{ mm}$$

$$D_3 = 202 + 10 = 212 \text{ mm}$$

$$D_4 = 212 + 16,8 = 228,8 \text{ mm}$$

Jednotlivé plochy jsou tedy:

$$S_1 = \pi \cdot D_1 \cdot l_v = 3,14 \cdot 0,185 \cdot 0,84 = 0,488 \text{ m}^2$$

$$S_2 = \pi \cdot D_2 \cdot l_v = 3,14 \cdot 0,202 \cdot 0,84 = 0,533 \text{ m}^2$$

$$S_3 = \pi \cdot D_3 \cdot l_v = 3,14 \cdot 0,212 \cdot 0,84 = 0,559 \text{ m}^2$$

$$S_4 = \pi \cdot D_4 \cdot l_v = 3,14 \cdot 0,2286 \cdot 0,84 = 0,603 \text{ m}^2$$

Celková plocha je  $S = 2,2 \text{ m}^2$ . Pro tři cívky potom  $S = 6,6 \text{ m}^2$ . Měrný tepelný proud je:

$$K_2 = \frac{P_K}{S_2} = \frac{4898}{6,6} = 742 \text{ W/m}^2$$

Oteplení magnetického obvodu:

$$P_0 = 3906 \text{ W}$$

Výpočet chlazené plochy:

Z rozměrů magnetického obvodu:

$$S_j = \pi \cdot D_j \cdot l_j = 3,14 \cdot 0,175 \cdot 1 = 0,55 \text{ m}^2$$

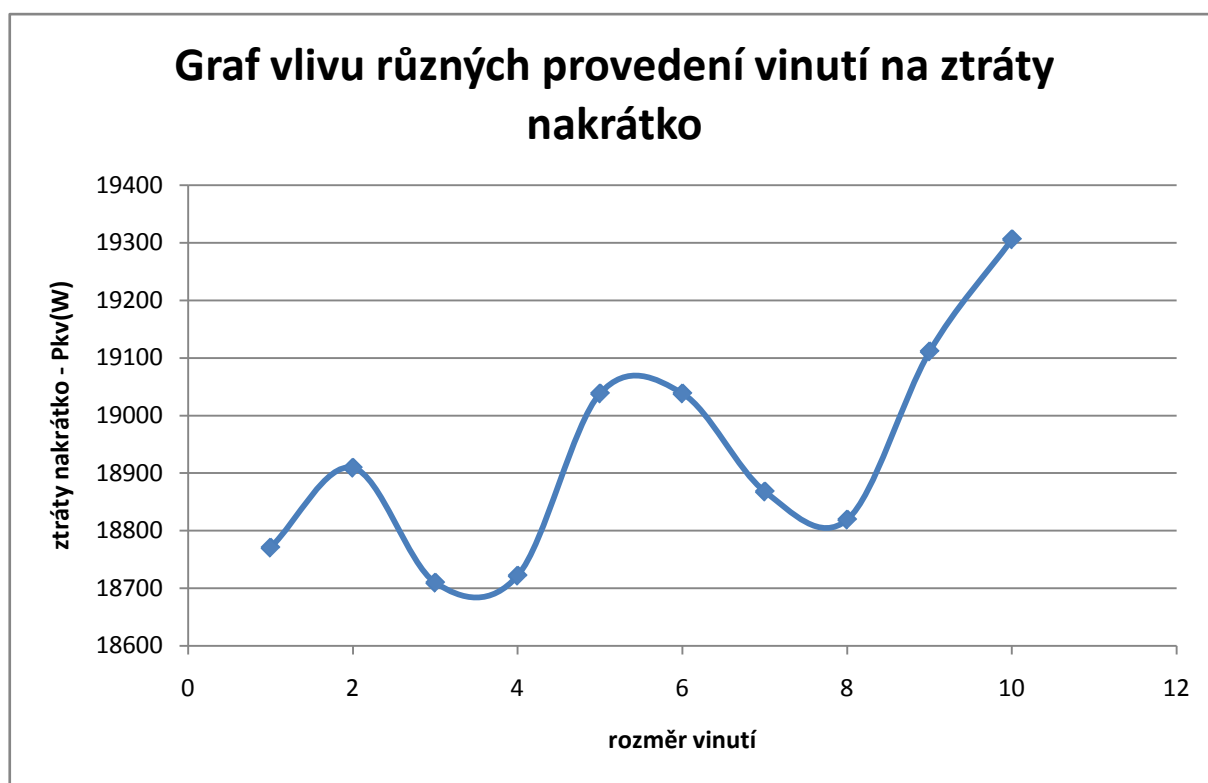
$$S_s = \pi \cdot D_s \cdot l_s = 3,14 \cdot 0,175 \cdot 1,4 = 0,77 \text{ m}^2$$

Celková plocha je  $S = 3,22 \text{ m}^2$ . Měrný tepelný proud je:

$$K_3 = \frac{P_0}{S} = \frac{3906}{3,22} = 1124 \text{ W/m}^2 \quad [2]$$

#### 4.7 Vliv různých provedení vinutí na ztráty nakrátko

Rozměr vinutí [mm]	13	15	20	24	48	60	12	19	38	76
	6x6	4x8	4x6	2x10	2x5	2x4	2π*6	2π*4	2π*2	2π*1
P <sub>kv</sub> [W]	18770,84	18909,47	18710,04	18722,2	19038,37	19038,37	18868,13	18819,48	19111,33	19305,9



## Závěr

V první kapitole jsou popsány teoretické vlastnosti a rozdělení transformátorů do skupin. Transformátor, který navrhujeme, patří do skupiny distribučních transformátorů. Celý výpočet je uveden ve čtvrté kapitole. Nejdříve jsme našli základní parametry, které vychází dle očekávání. Na primární straně vychází proud  $I = 17,36$  A, a průřez vodiče  $S_1 = 5,8$  mm<sup>2</sup> a z toho volíme nejbližší průřez vodiče dle tabulek  $S_1 = 6$  mm<sup>2</sup>. Na sekundární straně nám vychází, že je nejlepší zvolit obdélníkový vodič a rozměrech 2x10 mm. Dále jsme našli počty závitů  $N_1$  a  $N_2$ , které činí 4370 a 28 závitů. Návrh celkových rozměrů vyšel pro primární stranu 43,5x932 mm a pro sekundární stranu 16,8x940,4 mm. Dále jsou spočteny ztráty naprázdno, nakrátko a celkové. Dosahují hodnot ztráty naprázdno 3906,7W, ztráty nakrátko 20952W a celkové ztráty 24858,7W. Zadanou hodnotu  $u_k = 6\%$  jsme téměř dodrželi, protože nám vyšla hodnota  $u_k = 5,83\%$ . Všechny hodnoty vychází dle teoretických předpokladů.

Zvolili jsme správný rozměr vinutí, neboť jiné rozměry vinutí vycházejí daleko horší, jak je patrné z grafu pro vliv různých provedení vinutí na ztráty nakrátko.

Rozměry části stroje, které nebyly v práci počítány, ale byly zaznamenány na výkresech (např. průměr pojezdových koleček, jejich rozteč, výška či šířka transformátoru), byly převzaty z obdobného stroje uvedeného v katalogu.

## Použitá literatura

- [1] Petrov, G. N.: *Elektrické stroje 1*, Vydavatelství Academia, Praha 1980
- [2] Pešák, F.: *Výpočty transformátorů*, Technicko-vědecké vydavatelství, Praha, 1952
- [3] Hampl, J., Lipták J., Sedláček J, Štupl J.: *Materiály pro elektrotechniku*; Vydavatelství ČVUT, Praha 1996
- [4] <http://www.technickenormy.cz>, <http://www.wikipedia.cz>, <http://en.wikipedia.org/>
- [5] *Trafo CZ, a. s.* prezenční materiály

## Přílohy

Obsahuje technický výkres transformátoru



