

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Měření na transformátorech s různým magnetickým  
obvodem**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Václav ČUTKA**  
Osobní číslo: **E11B0012P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Měření na transformátorech s různým magnetickým obvodem**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Provedte měření naprázdno a nakrátko.
2. Určete parametry pro náhradní schéma transformátoru.
3. Určete ztráty, účinnost a úbytek napětí při jmenovité zátěži.
4. Vyhodnoňte výsledky 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., Skala, B.: Měření na elektrických strojích. Skripta ZČU, Plzeň 2002
2. Elektronické informační zdroje (IEEE)
3. Kulkarni, S.V., Khaparde S.A., Transformer Engineering, Design and Practise. CRC Press 2004.

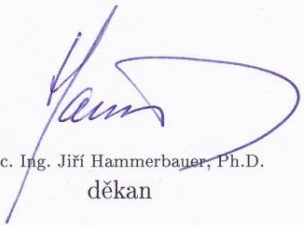
Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Jiří Zíka**


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**

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



  
Prof. Ing. Václav Kús, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Abstrakt**

Tato práce je zaměřena na vyhodnocení ztrát transformátoru naprázdno s různým magnetickým obvodem, ztrát nakrátko a úbytku napětí transformátoru. To vše při jmenovitém napětí. Dále určení prvků náhradního schématu. Obsahem práce je také princip transformátoru, popis druhů transformátoru a popis magnetického obvodu. Konec této práce pojednává o výsledcích a naměřených a vypočtených hodnotách.

## **Klíčová slova**

Trojfázový transformátor, ztráty nakrátko, ztráty naprázdno, úbytek napětí, magnetický obvod transformátoru, náhradní schéma.

## **Abstract**

This work is focused on the analysis of no-load losses, load losses and drop voltage in transformers, all for rated voltage. It also determines elements needed for an equivalent circuit. The work contains the principle of a transformer, describes different kinds of transformers and magnetic circuits. Finally this work shows and discusses measured and calculated results.

## **Key words**

Three phase transformer, load loss, no-load loss, drop voltage, magnetic circuit of transformer, equivalent circuit.

## Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 5.6.2014

Václav Čutka

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Jiřímu Zíkovi za jeho ochotu, připomínky a metodické vedení během zpracování bakalářské práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>1 PRINCIP ČINNOSTI TRANSFORMÁTORU</b> .....	<b>11</b>
1.1 ŠTÍTKOVÉ HODNOTY TRANSFORMÁTORU .....	13
1.2 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU .....	13
1.3 FÁZOVÝ DIAGRAM PRIMÁRNÍ A SEKUNDÁRNÍ STRANY .....	15
<b>2 KONSTRUKCE TRANSFORMÁTORU</b> .....	<b>17</b>
2.1 MAGNETICKÝ OBVOD TRANSFORMÁTORU .....	17
2.1.1 <i>Uspořádání magnetického obvodu</i> .....	18
2.1.2 <i>Materiály pro magnetické obvody</i> .....	20
2.1.3 <i>Skládání ocelových plechů</i> .....	21
2.2 VINUTÍ TRANSFORMÁTORU .....	23
2.3 TROJFÁZOVÝ TRANSFORMÁTOR .....	24
2.3.1 <i>Zapojení vinutí</i> .....	24
<b>3 ZTRÁTY TRANSFORMÁTORU</b> .....	<b>25</b>
3.1 ZTRÁTY NAPRÁZDNO .....	25
3.2 ZTRÁTY NAKRÁTKO .....	26
3.3 ZTRÁTY PŘÍDAVNÉ .....	27
<b>4 ÚČINNOST A ÚBYTEK NAPĚTÍ TRANSFORMÁTORU</b> .....	<b>28</b>
4.1 ÚČINNOST .....	28
4.2 ÚBYTEK NAPĚTÍ .....	28
<b>5 VLASTNÍ MĚŘENÍ</b> .....	<b>30</b>
5.1 PARAMETRY MĚŘENÉHO TRANSFORMÁTORU .....	30
5.2 SCHÉMA ZAPOJENÍ .....	31
5.3 POPIS MĚŘENÍ .....	31
5.4 NAMĚŘENÉ HODNOTY PŘEVODU A ODPORU VINUTÍ .....	32
5.5 VYPOČÍTANÉ HODNOTY .....	33
5.6 VÝPOČTY .....	37
5.6.1 <i>Měření naprázdno</i> .....	37
5.6.2 <i>Měření nakrátko</i> .....	38
5.7 VÝPOČET ÚBYTKU NAPĚTÍ .....	40
5.8 GRAFY .....	41
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>44</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>45</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>46</b>



## Seznam symbolů a zkratek

$B$	.....	Magnetická indukce [T]
$\cos\varphi$	.....	Účinník [-]
$f$	.....	Frekvence [Hz]
$I_1, I_2$	.....	Proudy primárního a sekundárního vinutí [A]
$I_{Fe}$	.....	Magnetizační proud [A]
$k$	.....	Převod transformátoru [-]
$K_{mtp}$	.....	Měřicí převod transformátoru
$m$	.....	Počet fází
$N_1, N_2$	.....	Počet závitů primárního a sekundárního vinutí [-]
$R_1, R_2$	.....	Odpory primárního a sekundárního vinutí [ $\Omega$ ]
$R_{Fe}$	.....	Odpor respektující ztráty v železe [ $\Omega$ ]
$U_1, U_2$	.....	Napětí primárního a sekundárního vinutí [V]
$u_i$	.....	Indukované napětí [V]
$v_n, n_n$	.....	Vysoké napětí, nízké napětí
$X_\mu$	.....	Příčná reaktance [ $\Omega$ ]
$X_{\sigma 1}, X_{\sigma 2}$	.....	Rozptylové reaktance [ $\Omega$ ]
$\Delta P_0$	.....	Ztráty naprázdno [W]
$\Delta P_{Fe}$	.....	Ztráty v železe [W]
$\Delta P_{FeH}$	.....	Ztráty hysterezní [W]
$\Delta P_{FeV}$	.....	Ztráty vířivými proudy [W]
$\Delta P_j$	.....	Joulovy ztráty [W]
$\Delta P_p$	.....	Ztráty přídatné [W]
$\Delta u$	.....	Úbytek napětí [-]
$\eta$	.....	Účinnost [%]
$\Phi_{mp}$	.....	Max.hodnota vzájemného toku [Wb]
$\Psi$	.....	Magnetický tok celého vinutí [Wb]

## Úvod

Předložená bakalářská práce se skládá z pěti částí. První z nich se zabývá principem činnosti transformátoru, náhradním schématem, štítkovými hodnotami a fázovým diagramem. Druhá část je zaměřena na konstrukci magnetického obvodu, tedy jeho uspořádání a použité materiály. Dále je zde zmíněno vinutí transformátoru. Ve třetí části jsou popsány ztráty naprázdno, nakrátko a ztráty přídavné. Čtvrtá kapitola obsahuje popis účinnosti a úbytku napětí. Vlastní měření a výpočty jsou uvedeny v poslední části bakalářské práce.

Cílem této práce je provedení měření naprázdno s různým magnetickým obvodem a měření nakrátko. Z naměřených hodnot mají být dopočítány prvky náhradního schématu. Pro jmenovité napětí ztráty a úbytek napětí.

# 1 Princip činnosti transformátoru

## Význam a použití

Transformátor je střídavý, netočivý stroj, který se používá hlavně k přizpůsobení napětí nebo proudu, přičemž kmitočet je stejný na vstupu i na výstupu transformátoru. Transformátor má zpravidla dvě vinutí, primární a sekundární. Do primárního vinutí se přivádí elektrická energie, která se transformuje do sekundárního vinutí, přičemž její charakter zůstává nezměněn. Velikost výstupních či vstupních napětí, proudů nebo závitů je dána převodem transformátoru, který je dán vztahem: [5,9]

$$k = \frac{N_1}{N_2} \cong \frac{U_1}{U_2} \cong \frac{I_2}{I_1} \quad (1.1.)$$

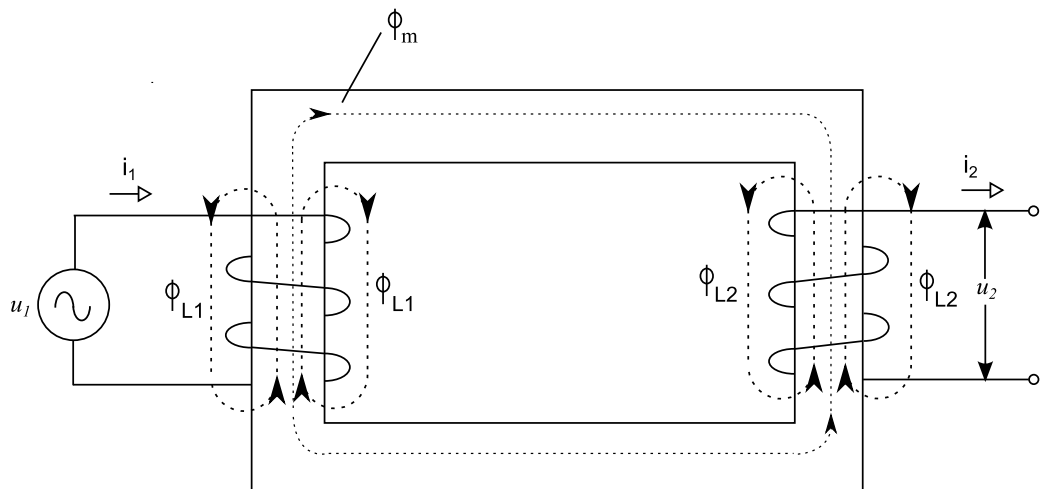
Největší význam transformátorů je při přenosu a rozvodu elektrické energie, kdy při přenosu na velké vzdálenosti se jimi obvykle zvyšuje napětí (zmenšuje proud), čímž se snižují ztráty ve vedení a zvětšuje přenášený výkon. Celkový instalovaný výkon transformátorů je 5x i vícekrát vyšší než instalovaný výkon všech alternátorů, protože střídavý proud je několikrát transformován. [5,12]

Jmenovité výkony jsou řádově desetiny VA až stovky MVA a jmenovitá napětí se pohybují od desetin V až ke stovkám kV. Transformátory malých výkonů se používají například v radiotechnice, ve sdělovací a regulační technice. Naopak transformátory mezních výkonů se používají jako blokové transformátory v elektrárnách nebo velkých rozvodnách. [5,12]

## Princip činnosti

Transformátor využívá principu elektromagnetické indukce, kdy se podle Maxwell-Faradayova zákona (1.2.) změnou spřaženého toku  $\psi$  v sekundárním popřípadě i terciárním vinutí indukují napětí. [5]

$$e = -u_i = -\frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\phi_m}{dt} \quad (1.2.)$$



Obr.1.1. Princip jednofázového transformátoru [15]

Pro harmonický časový průběh toku platí:

$$\phi(t) = \phi_{mp} \sin(\omega t + \alpha) \quad (1.3.)$$

kde  $\phi_{mp}$  je maximální hodnota vzájemného toku  $\phi(t)$  a  $\omega = 2\pi f$  [rad/s]. Potom dosazením hodnoty do (1.1.), dostáváme vztah:

$$u_i(t) = N_1 \cdot \omega \cdot \phi_{mp} \cdot \cos(\omega t + \alpha) \quad (1.4.)$$

$$U_{im} = N_1 \cdot \omega \cdot \phi_{mp} \quad (1.5.)$$

Pro efektivní hodnotu (r.m.s.) indukovaného napětí vydělíme vztah (1.5.) odmocninou ze dvou. Po úpravě dostáváme:

$$U_{i1} = 4,44 N_1 \cdot \phi_{mp} \cdot f \quad (1.6.)$$

[1,8]

## 1.1 Štítkové hodnoty transformátoru

1. Druh transformátoru
2. Jmenovitý zdánlivý výkon [kVA]
3. Jmenovité napětí [V]
4. Jmenovitý proud [A]
5. Jmenovitý kmitočet [Hz]
6. Počet fází
7. Spojení fází
8. Procentní napětí nakrátko
9. Druh zatížení
10. Druh chlazení
11. Převod transformátoru
12. Druh prostředí, ve kterém může transformátor pracovat
13. Krytí transformátoru
14. Třída izolace vinutí

[2]

## 1.2 Náhradní schéma transformátoru

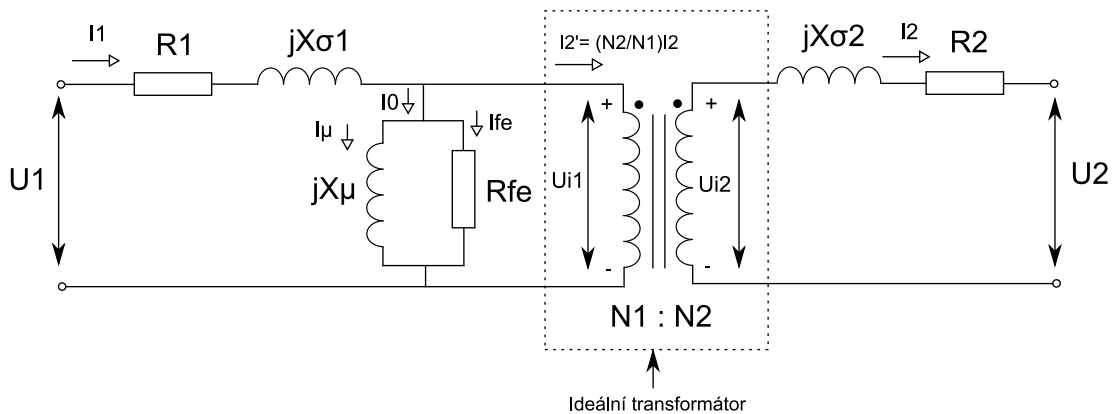
Předpokládejme ideální transformátor (Obr.1.2.). Celkový proud naprázdno  $I_0$  se skládá z magnetizační složky  $I_m$  odpovědné za produkování vzájemného toku  $\phi_m$  a ztrátové složky v železe  $I_{Fe}$  počítající aktivní příkon ze zdroje potřebný na pokrytí ztrát naprázdno i nakrátko. Magnetizační složka je reprezentována induktivní reaktancí  $X_\mu$ , zatímco ztráty v železe jsou zastoupeny odporem  $R_{Fe}$ .

Nechť  $R_1$  a  $R_2$  jsou odpory vinutí primární a sekundární strany. V praktickém provedení transformátoru nejsou některé části toku v primárním vinutí spojeny se sekundárním. Tato část toku je úměrná primárnímu proudu a zodpovědná za úbytek napětí, které je zastoupeno induktivní reaktancí  $X_{\sigma 1}$ , připojené sériově k primárnímu vinutí ideálního transformátoru. Podobně tak  $X_{\sigma 2}$ , která je spojena pouze s tokem tekoucím přes sekundární vinutí. Proto tyto prvky lze zanedbat, jestliže je všechny převedeme na primární nebo sekundární stranu transformátoru. [1]

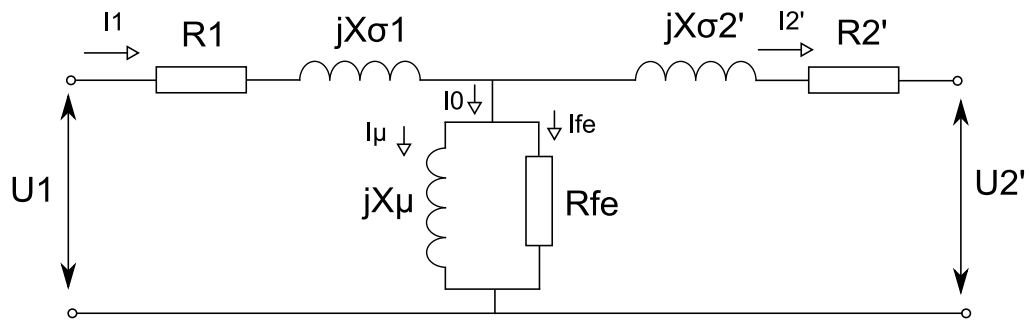
Převedení na primární stranu (Obr.1.3.) vypadá takto:

$$X_{\sigma 2}' = X_{\sigma 2} \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 = X_{\sigma 2} k^2 \quad (1.7.)$$

$$R_2' = R_2 \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (1.8.)$$



Obr.1.2. Náhradní schéma ideálního transformátoru [1]



Obr.1.3. Náhradní schéma skutečného transformátoru [1]

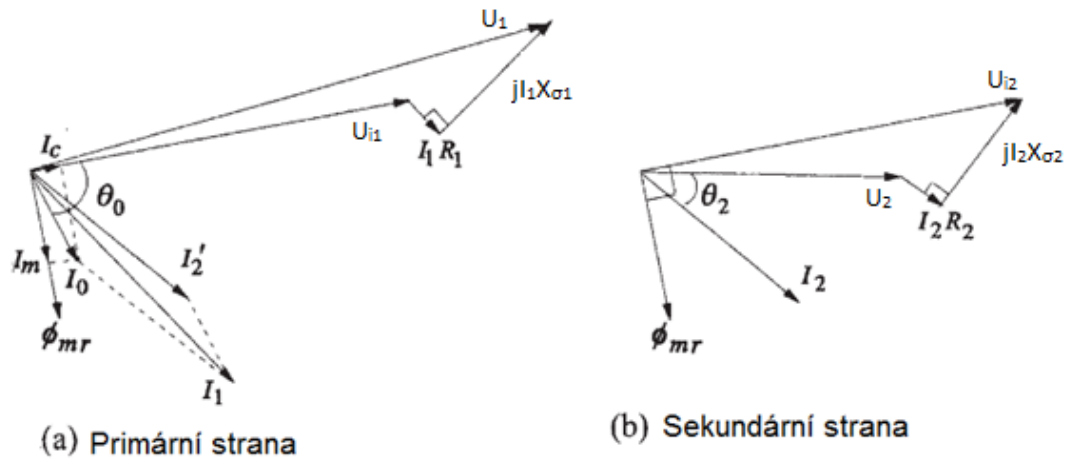
### 1.3 Fázový diagram primární a sekundární strany

Při kreslení fázových diagramů musí být zachovány stejné frekvence pro všechny prvky. Magnetizační charakteristika není lineární a to vede na vyšší harmonické magnetizačního proudu pro sinusový průběh aplikovaného napětí při základní frekvenci. Ve vektorovém diagramu však uvažujeme pouze základní harmonickou a tedy lineární B-H charakteristiku. Pro obvod (Obr.1.3.) můžeme psát rovnice:

$$U_1 = U_{i1} + (R_1 + jX_{\sigma 1}) I_1 \quad (1.9.)$$

$$U_2 = U_{i2} - (R_2 + jX_{\sigma 2}) I_2 \quad (1.10.)$$

Na fázových diagramech (Obr.1.4.) vidíme, že výstupní napětí  $U_2$  je bráno jako referenční napětí ve fázi s osou x. Indukovaná napětí jsou ve fázi a vzájemný tok  $\phi_{mr}$  (efektivní hodnota  $\phi_m$ ) je od nich posunut o  $90^\circ$  v souladu s rovnicí (1.2.). Složka proudu  $I_0$ ,  $I_m$  je ve fázi s  $\phi_{mr}$ , kdežto  $I_c$  je posunuta o  $90^\circ$  a ve fázi s  $U_{i1}$ . Proud  $I_2'$  je stejný jako proud  $I_2$  a platí, že oba diagramy jsou brány jako ekvivalentní. Je zde nějaký fázový posuv mezi  $U_1$  a  $U_2$  ,vzhledem k úbytkům napětí v rozptylových impedancích. Úbytky napětí v odporech a rozptylových reaktancích jsou zveličeny ve vektorovém diagramu.



Obr 1.4. Fázový diagram [1]



## 2 Konstrukce transformátoru

Základními prvky, ze kterých se transformátor skládá, jsou magnetický obvod, jímž se uzavírá magnetický tok a vinutí. U velkých transformátorů se obvykle používá nádoba, do které se umístí transformátor společně s chladícím médiem např. olejem.

Transformátor je v nádobě spolu s olejem, které mohou být jak minerální, tak syntetické. Hlavní předností syntetických olejů je nehořlavost a dielektrická konstanta, jejíž hodnota je přibližně stejná jako u běžně používaných izolačních materiálů. Dále mají menší měrnou hmotnost, menší viskozitu a lepší chladihost. Naopak nevýhoda je vysoká cena a plyny vznikající při jeho používání jsou zdraví nebezpečné, proto je u nás použití syntetických olejů zakázáno. [5]

Nádoby se používají hladké nebo žebrované. Ty mohou být zejména u velkých transformátorů z vnější strany vybaveny trubkovými nebo radiátorovými chladiči, které se ofukují vzduchem a tím se zlepšuje ochlazování oleje procházeným v radiátorech (trubkách). Transformátory konstruované pro největší výkony mají nucený oběh oleje- ten je chlazen mimo nádobu transformátoru, pro menší výkony postačuje transformátor bez nuceného oběhu, kterému říkáme konzervátor

Na víku nádoby je umístěna sada průchodek vn (většinou 3), pro vyvedení jednotlivých fází z transformátoru přes nádobu. Dále jsou zde průchodky nn, ty jsou obvykle 4, pro 3 fáze a uzem. Průchodky jsou většinou porcelánové. [5,10,11]

### 2.1 Magnetický obvod transformátoru

Magnetický obvod transformátoru je tvořený transformátorovými plechy, které slouží k uzavření magnetického toku a ze stahovací konstrukce, sloužící také k uložení vinutí. Sloupce transformátoru tzv. jádra, na která jsou nasunována vinutí jsou odstupňovaného průřezu, navrženého tak, aby dělal nejlépe kruhovou plochu. [12,16]

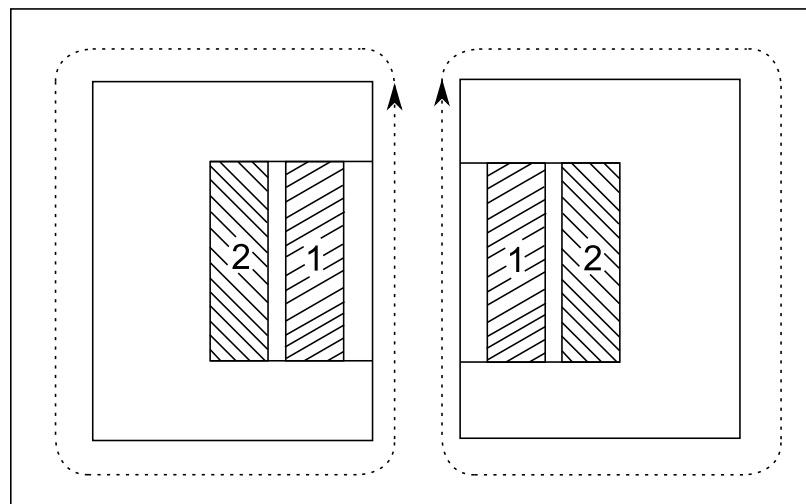
Plechý mívají tloušťku 0,28mm; 0,35mm a maximálně 0,5 mm. Jsou od sebe izolovány nejčastěji lakem a legovány křemíkem, kvůli zmenšení ztrát vířivými proudy. Omezení ztrát hysterezních se provádí tak, že se použije magneticky měkký materiál (užší hysterezní smyčka). [5,12]

### 2.1.1 Uspořádání magnetického obvodu

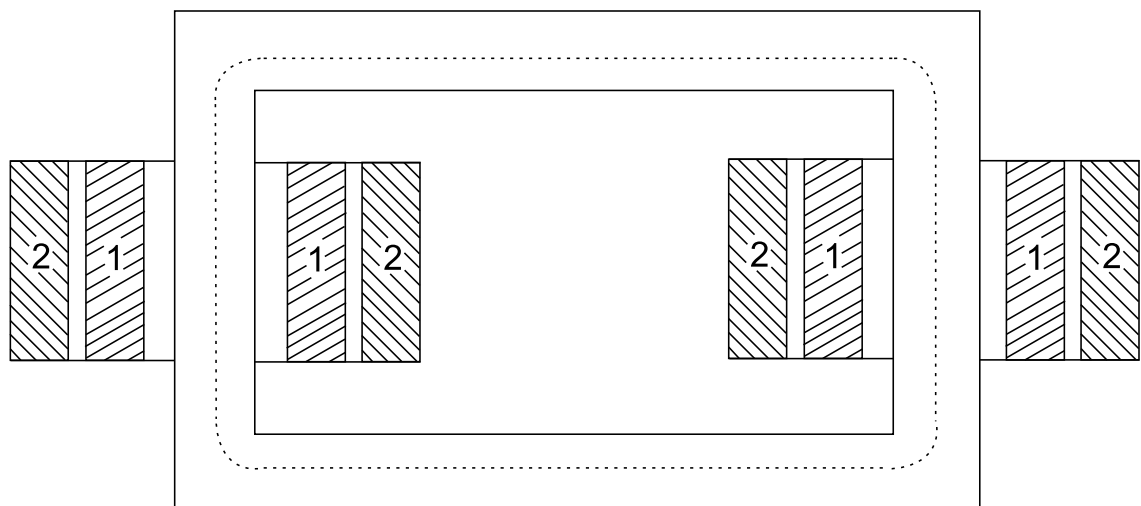
Hlavní provedení magnetického obvodu bývá plášťové (obr. 2.1) nebo jádrové (obr. 2.2). [12,1]

Plášťová uspořádání mají vinutí navinuty na vnitřním sloupku jádra a magnetický tok je rovnoměrně rozdělen mezi dva postranní sloupky, které mají mít poloviční průřez než sloupek hlavní. Je sice konstrukčně složitější a těžší než jádrové, avšak má menší rozptylové toky při zachování tvaru cívek, tím i menší ztráty. Plášťové uspořádání je tvrdší, protože jeho sekundární napětí fluktuuje méně se změnou zátěže než u jádrového uspořádání. Je také konstrukčně nižší. [1,10,14]

Jádrová uspořádání mají vinutí naopak stejně rozděleny na všechny sloupky, přičemž sloupky jádra jsou shodného průřezu. Tento typ transformátoru je výhodnější a více se používá, protože je konstrukčně jednodušší. Chlazení je snazší a snadno se opravuje. Srovnání jednofázového proti trojfázovému transformátoru je takové, že jeden trojfázový vyjde přibližně o čtvrtinu levněji než použití tří jednofázových. [5,1,10]



Obr.2.1. Plášťové uspořádání 1-f transformátoru [15]



Obr.2.2. Jádrové uspořádání 1-f transformátoru [15]

## 2.1.2 Materiály pro magnetické obvody

Jako materiály používané pro části magnetického obvodu se používají tenké ocelové plechy pro elektrotechniku, litá ocel nebo litina. [2]

Plechy pro elektrotechniku se válcují, a to za tepla, za studena nebo se provádí kombinace obou způsobů. Jsou dodávány ve svitcích a pásech, ale i v tabulích. [4]

Při válcování za tepla, které se dnes nepoužívá, jsou krystalky uspořádány náhodně a plechy tak mají ve všech směrech stejné vlastnosti (izotropní). Označovaly se jako Et plechy (elektrotechnické plechy tabulové) a byly vyráběny v několika variantách pro různé magnetické vlastnosti udávané ztrátovým číslem  $p_1$ , které udává ztráty vztažené na 1 kg hmotnosti plechu pro magnetickou indukci 1 T a pro frekvenci 50 Hz.

V současné době se využívá magnetických vlastností plechů válcovaných za studena  $E_o$  a  $E_i$ , které jsou propracované a technicky dobře ovladatelné. Lze u nich dosáhnout magnetické indukce  $B$  až 1,8 T a přitom ztráty na 1 kg jsou menší než u za tepla válcovaných. Jsou sice dražší než za tepla válcované, ale mají menší rozměry a menší ztráty, proto jsou celkově výhodnější. U těchto plechů se doporučuje stahování, při kterém se nepoužívají šrouby nebo se používají šrouby izolované od samotného magnetického obvodu. [4,10,12]

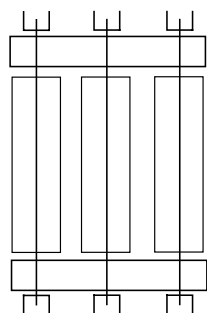
Plechy  $E_o$  (elektrotechnické plechy orientované) jsou anizotropní, mají dobré vlastnosti ve směru válcování a směru na něj kolmém ovšem směr úhlopříčky je nesnadným směrem magnetování. Už při jejich výrobě jsou opatřeny izolační vrstvou, která slouží jako izolant mezi plechy v magnetickém obvodu, pro zmenšení ztrát vířivými proudy a brání vzájemnému svaření závitů svitků při tepelném zpracování.

Plechý  $E_i$  se používají především pro jádra malých transformátorů. Jsou izotropní. Oproti plechům  $E_t$  mají  $E_i$  znatelně nižší hlavně hysterezní ztráty, dále jsou i mechanické vlastnosti lepší. Lze použít technologii lisování automatickými rychlolisy, kdy je potřeba právě dobrých a rovnoměrných mechanických vlastností pásů. [4,7]

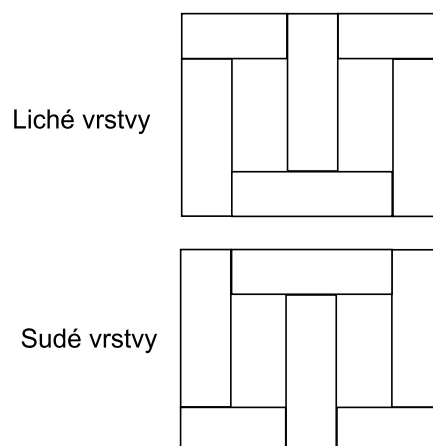
### 2.1.3 Skládání ocelových plechů

Ocelové plechy se skládají tupým stykem nebo přeplátováním. U menších výkonů se používá skládání s tupým stykem, kdy se jádra a spojky skládají z plechů samostatně a poté jsou spojovány do jednoho obvodu pomocí vertikálních stahovacích svorníků (obr.2.3). Mezi výhody řadíme snadnou montáž a demontáž. Nevýhodou jsou značné ztráty vířivými proudy, jestliže nepoužijeme mezi jádry a spojkami pevné tenké izolační vložky. Toto skládání se dnes již moc nepoužívá.

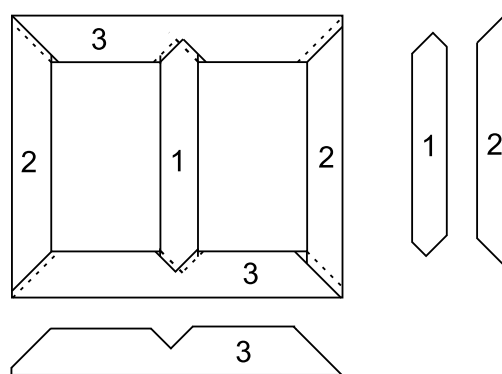
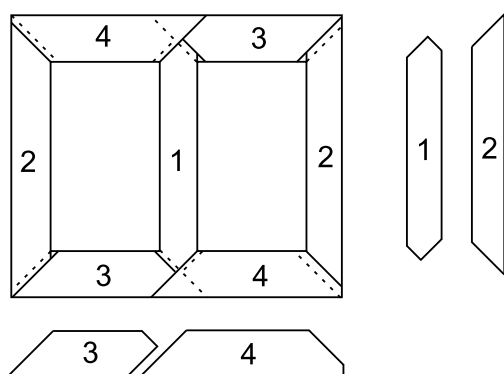
Oproti tomu v přeplátovaných magnetických obvodech se jádra i spojky skládají současně. Jsou zde dva způsoby skládání a to skládat plechy pod úhlem  $90^\circ$  a střídat sudé a liché vrstvy (obr. 2.4), nebo skládání pod úhlem  $45^\circ$  (obr. 2.5). Skládání plechů pod úhlem  $90^\circ$  je z hlediska výroby jednodušší, ale u orientovaných plechů zde vznikají ztráty v rohových spojích, zapříčiněné tím, že směry magnetizace jsou na sebe kolmé. Proto se používají jen u malých výkonů. U skládání pod úhlem  $45^\circ$  se už ztráty tolik neuplatňují. Je zde používána metoda step-lap (obr.2.6a) kvůli své účinnosti. Délka plechů se po malých krůčcích zvětšuje tak, aby sousední plechy neměly společnou hranu styku jádra a spojky. Skládá se ze skupin po 5 až 7 plechách. Metoda step-lap (obr.2.6a) je složitější než konvenční (obr.2.6b), ale vynahrazuje to výrazným zmenšením reluktance. [1,2,18]



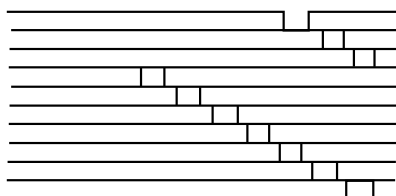
Obr. 2.3. Magnetický obvod s tupým stykem [2]



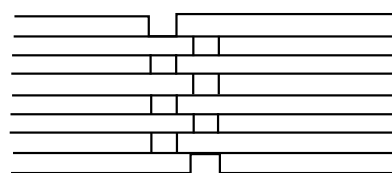
Obr. 2.4. Překlávané pod úhlem 90° [2]



Obr. 2.5. Překlávané pod úhlem 45° [2]



Obr.2.6a. Metoda step-lap [1]

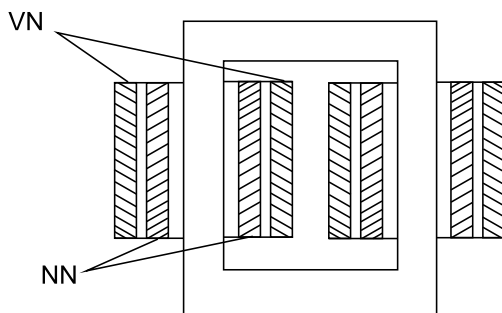


Obr.2.6b. Metoda konvenční [1]

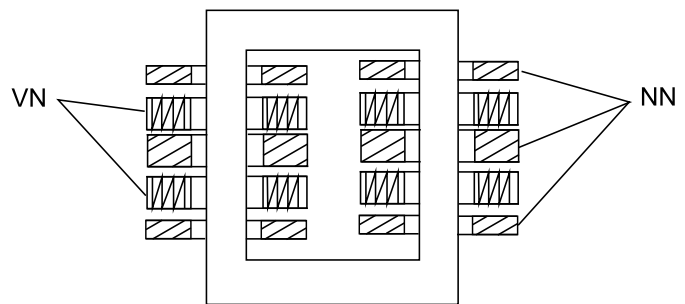
## 2.2 Vinutí transformátoru

Vinutí je konstruováno na základě dvou hlavních parametrů tj. jmenovitého proudu a jmenovitého napětí transformátoru. Jmenovitý proud má vliv na volbu průřezu vodičů, popř. i na počet paralelních větví. Vodiče jsou kruhového tvaru nebo čtyřhranné (obdélník, čtverec). Naopak podle jmenovitého napětí volíme konstrukci izolace hlavně mezi závitů a cívkami. [2]

Transformátory se podle uspořádání vinutí vyššího a nižšího napětí dělí na sousá (páková) (obr. 2.7) a prostřídaná (kotoučová) (obr. 2.8).



Obr. 2.7. Souosá vinutí [16]



Obr. 2.8. Prostřídaná vinutí [16]

Pro sousá vinutí platí, že cívky vyššího a nižšího napětí jsou na sobě, kdy cívky nižšího napětí jsou obvykle blíže k jádru transformátoru. Střídají-li se dvakrát, jde o soustředěné dělené vinutí. U prostřídaného vinutí, jak již název napovídá, jsou cívky vyššího napětí prostřídané s nižším. Jsou umístěny vodorovně a používají se nejvíce u plášťových transformátorů. Pro magnetickou souměrnost se volí na koncích jader poloviční cívky nižšího napětí. [1,2,12,16]

## 2.3 Trojfázový transformátor

Na rozdíl od jednofázového, má trojfázový transformátor pro vinutí každé ze tří fází společný magnetický obvod. Jejich použitím se sníží spotřeba aktivního materiálu. Na druhou stranu při poruše nedodává transformátor elektrickou energii. Použitím tří jednofázových transformátorů tomu tak není, při poruše jednoho, zbylé dva zůstávají v provozu. [2,3]

Tři jednofázové transformátory prostorově natočeny o  $120^\circ$ , spojeny tak, aby každé z jader transformátorů tvořily společný magnetický obvod, jsou v podstatě trojfázový transformátor. Ve skutečnosti je zde jen rozdíl ve vynechání spojek jednoho transformátoru. Zbylé obvody fází se dají do jedné roviny. To je výhodné při výrobě a ušetří se tak místo. Naopak se transformátor stává nesouměrným, protože délka střední fáze je kratší. Tato nesouměrnost je však velmi malá, jelikož se spojky navrhují s větším průřezem, než je průřez jádra. [17,13]

### 2.3.1 Zapojení vinutí

Jsou 3 základní druhy zapojení a to do hvězdy Y (y), trojúhelníku D(d) nebo lomené hvězdy Z (z). Značení jednotlivých zapojení se provádí malým nebo velkým písmenem. Strana vyššího napětí je označována velkým písmenem a nižšího malým písmenem.

Například spojení **Yy** se využívá hlavně u menších a středních výkonů, je nejlevnější, ale jeho nevýhodou je vznik třetí harmonické proudu a při nesouměrném zatížení fází vzniká stejnosměrná magnetizace. Tato nerovnost zatížení se může odstranit terciárním vinutím spojeným do trojúhelníka.

Spojení **Yd** je používáno hlavně pro velké transformátory, blokové, pracující společně s generátorem. Nevzniká zde třetí harmonická proudu.

Spojení **Dy** je vhodné pro světelné sítě, protože snese nesouměrné zatížení, nemá třetí harmonickou ani přídavný rozptyl. [6,9]



### 3 Ztráty transformátoru

U transformátoru hovoříme o ztrátách v železe (naprázdno), ztrátách ve vinutí (nakrátko) a ztrátách přidavných (rozptylových). [10]

#### 3.1 Ztráty naprázdno

Vycházejí z chodu naprázdno (Obr.3.1.) , kdy jsou výstupní svorky rozpojené a transformátor pracuje s nulovým zatížením, činným i jalovým výkonem a proudem. Transformátor odebírá ze sítě proud  $I_0$  a jeho velikost se pohybuje od 3-4%  $I_n$ . Měření je prováděno do 130%  $U_n$  a měří se hodnoty  $U_0$ ,  $I_0$  a  $P_0$ . [15,12,14]

Z náhradního schématu lze vyčíst, že při chodu naprázdno proud prochází pouze přes impedance  $Z_0$  a  $Z_1$ , proto lze psát:

$$\Delta P_0 = (R_1 + R_0) I_{10}^2 \quad (3.1.)$$

Odpor  $R_0$  většinou bývá však v porovnání s  $R_1$  podstatně větší, Joulovy ztráty v primárním vinutí  $\Delta P_{j_0}$  lze zanedbat a ztráty naprázdno se rovnají přibližně ztrátám v železe, tedy:

$$\Delta P_0 \approx \Delta P_{Fe} = R_0 I_{10}^2 \quad (3.2.)$$

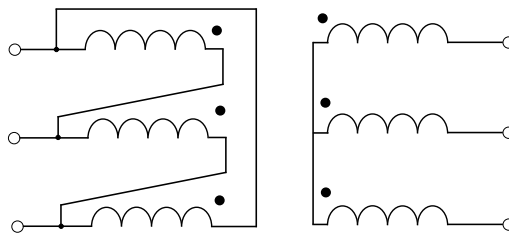
Ztráty v železe jsou složeny ze ztrát vířivými proudy  $\Delta P_{FeV}$  a hysterezních ztrát  $\Delta P_{FeH}$ . Hysterezní ztráty jsou u moderních materiálů, kvůli úzké hysterezní smyčce, malé a platí:

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

Ztráty vířivými proudy jsou charakterizovány:

$$\Delta P_{FeV} = B^2 f^2 \quad (3.4.)$$

[2,6]



Obr. 3.1. Zapojení transformátoru naprázdno

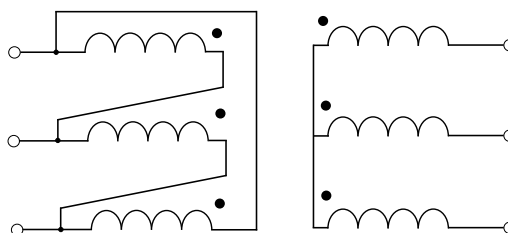
### 3.2 Ztráty nakrátko

Ztráty nakrátko ( $\Delta P_k$ ) jsou měřeny při zkratovaných výstupních svorkách (Obr.3.2.). Jestliže transformátorem prochází jmenovitý proud  $I_n$ , pak je na vstupu transformátoru napětí nakrátko  $U_{kn}$ . To se většinou uvádí v poměrných hodnotách a jeho velikost  $u_k$  se pohybuje od 4 až do 12% pro výkonové transformátory, transformátory pro výkonovou elektroniku mají  $u_k$  až 30%. Velikost  $u_k$  je nutno volit tak, aby nedocházelo ke zkratu či k velkým ztrátám s ohledem na jeho pracovní režim. Malá hodnota  $u_k$  totiž znamená menší úbytek napětí, ale menší zkratuvzdornost. Naopak pro velké  $u_k$  je větší úbytek napětí a výhodou je větší zkratuvzdornost. Jsou měřeny hodnoty  $U_{1k}$ ,  $I_{1k}$ ,  $\Delta P_k$ . [17]

Ztráty v železe jsou rovny nule a zanedbáváme tedy příčnou větve, kdy  $I_0=0$ . Na pokrytí ztrát jsou brány jen Joulovy ztráty a platí zde vztah:

$$\Delta P_k = \Delta P_j = m (R_1 + R_2) I^2 + \Delta P_p \quad (3.5.)$$

[6,10,15]



Obr. 3.2. Zapojení transformátoru nakrátko

### 3.3 Ztráty přídatné

Ke ztrátám nakrátko se připočítávají i ztráty přídatné (3.5.). Jsou to ztráty, které jsou způsobeny vířivými proudy ve vodičích a nacházející se ve střídavém rozptylovém magnetickém poli. Ztráty jsou přímo úměrně závislé na rozměru vodiče, který je kolmý k rozptylovému poli. Ztráty omezíme, když při stejné šířce vinutí budeme mít více poloh spojených za sebou. Proto se často v místech, kde se magnetický tok ohýbá, vinutí dělá z paralelně spojených vodičů menších rozměrů. Dále mezi tyto ztráty patří ztráty vzniklé uzavíráním rozptylového magnetického toku přes stěny nádoby a ztráty ve stahovací konstrukci magnetického obvodu. [1,3]

## 4 Účinnost a úbytek napětí transformátoru

### 4.1 Účinnost

Účinnost transformátoru, je jako u jiných zařízení definována jako poměr činného výkonu k činnému vstupnímu příkonu. [1,2]

$$\eta = \frac{P}{P_p} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1} \quad (4.1.)$$

Její hodnota se pohybuje v rozmezí od 95% do 99%. Pro velké transformátory s malými ztrátami může být účinnost až 99,7%. Je tu ale možnost chyby, která je dána změřenými hodnotami vstupních a výstupních veličin, kdy wattmetr může mít chybu okolo 1%. Proto je přesnější určovat účinnost pomocí změřených výstupních hodnot a ztrát z měření nakrátko a naprázdno. Tato účinnost je pak dána vztahem (4.2.) [1,2,13]

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \Delta P_0 + \Delta P_k} \quad (4.2.)$$

### 4.2 Úbytek napětí

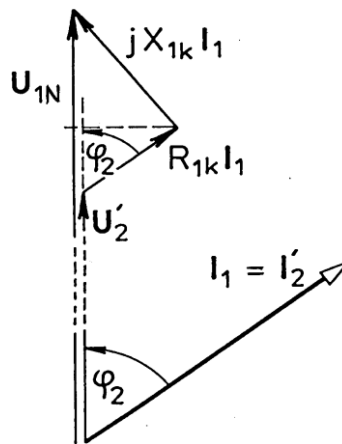
Je to aritmetický rozdíl výstupního napětí naprázdno a výstupního svorkového napětí, které je měřeno při daném zatěžovacím proudu, účinníku, jmenovitém vstupním napětí a jmenovitém kmitočtu.

Poměrný úbytek napětí je vyjádřen vztahem:

$$\Delta u = \frac{|U_{20}| - |U_2|}{|U_{20}|} \quad (4.3.)$$

Velikost  $\Delta u$  lze určit z fázového diagramu (obr..) při zanedbání proudu  $I_{10}$ . Za předpokladu, že vstupní a výstupní napětí jsou ve fázi, fázový diagram vypadá dle obr.4.2.a lze psát vztah:

$$\Delta u \cong \frac{R_{1k} I_1 \cos \varphi_2 + X_{1k} I_1 \sin \varphi_2}{U_{1n}} = (r_{1k} \cos \varphi_2 + x_{1k} \sin \varphi_2) \cdot \left( \frac{I_1}{I_{1n}} \right) \quad (4.4)$$



Obr.4.2. Celkový úbytek napětí [17]

Rovnice (4.4) přibližně platí při uk menší nebo rovno 4%. Při větším uk není možno uvažovat napětí ve fázi a celkový úbytek je pak počítán ze vztahu:

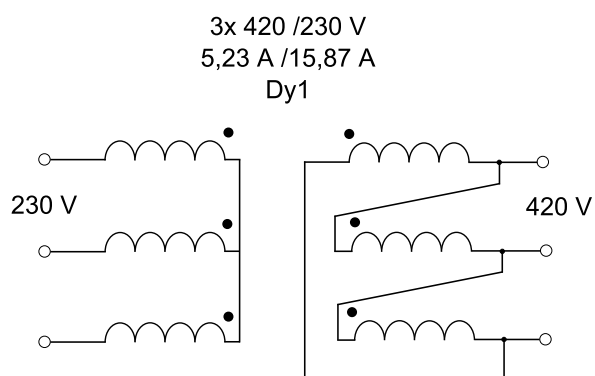
$$\Delta u = (r_{1k} \cos \varphi_2 + x_{1k} \sin \varphi_2) \cdot \left( \frac{I_1}{I_{1n}} \right) + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{I_1}{I_{1n}} \right)^2 (x_{1k} \cos \varphi_2 - r_{1k} \sin \varphi_2)^2 \quad (4.5.)$$

[5,6,17]

## 5 Vlastní měření

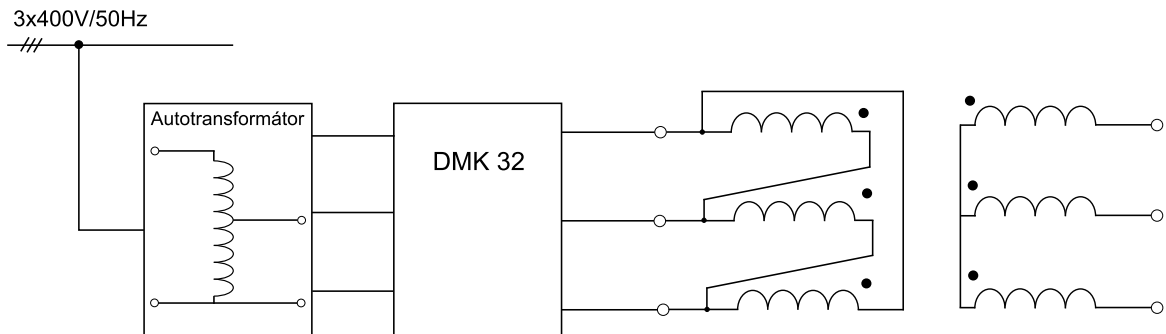
### 5.1 Parametry měřeného transformátoru

Primární vinutí	420V, 5,23A spojení D
Sekundární vinutí	230V, 15,87A, spojení Y
Tloušťka plechů	0,5 mm
Navržené sycení mag. obvodu	1,3 T

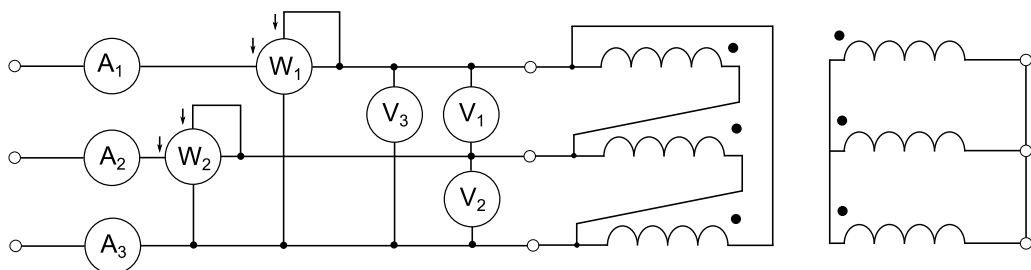


Obr. 5.1. Schéma zapojení vinutí transformátoru

## 5.2 Schéma zapojení



Obr. 5.2. Schéma zapojení: měření naprázdno



Obr. 5.3. Aronovo zapojení: měření nakrátko

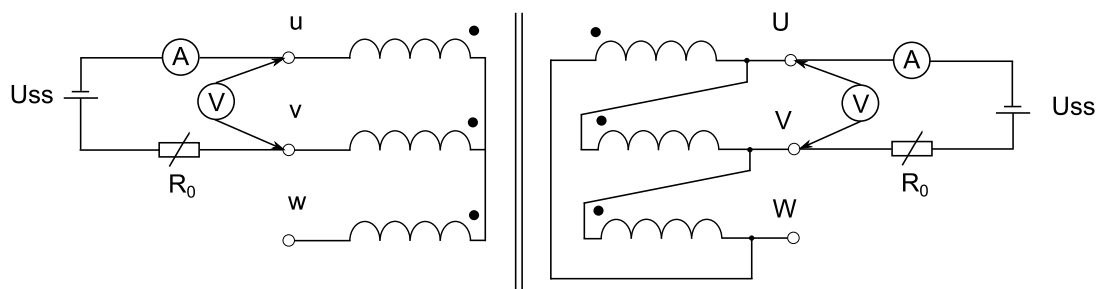
## 5.3 Popis měření

Dle schématu zapojení (Obr. 5. 2.) byl sestaven obvod a provedeno měření naprázdno pomocí přístroje DMK 32. Nejdříve byl měřen transformátor v původním (originálním) stavu (Příloha 5). Pro zvolené zapojení byl měřen i odpor vinutí a převod transformátoru. Měření bylo provedeno pouze do 390V.

Odpor vinutí byl měřen ohmovou metodou (Obr.5.4.) za použití stejnosměrného zdroje napětí, ampérmetru na rozsahu 600mA, digitálního voltmetru a odporu. Měřilo se tak, aby se výchylka ampérmetru pohybovala v poslední třetině stupnice. Protože bylo primární vinutí zapojení do trojúhelníka, nebyl měřen odpor sdružený (kvůli zjednodušení), ale samotné hodnoty odporu vinutí. V dalších vzorečkách tedy nebyl použit vztah pro sdružené hodnoty. Převod transformátoru byl měřen pomocí napětí, kdy byl dán podílem vstupního a výstupního napětí (1.1.).

Poté bylo provedeno měření s lícovanými šrouby namísto původních a měření v kombinaci těchto šroubů navíc na různých místech.

Nakonec bylo provedeno měření nakrátko pomocí Aronova zapojení (Obr.5.3.). Transformátor byl měřen v původním stavu.



Obr. 5.4. Princip měření odporu vinutí transformátoru [3]

## 5.4 Naměřené hodnoty převodu a odporu vinutí

Převod:

svorky	sekundár	primár	převod
ab	56,2	100,4	1,786476868
bc	55,8	100,5	1,801075269
ac	56,2	101,4	1,804270463
			<b>1,7972742</b>

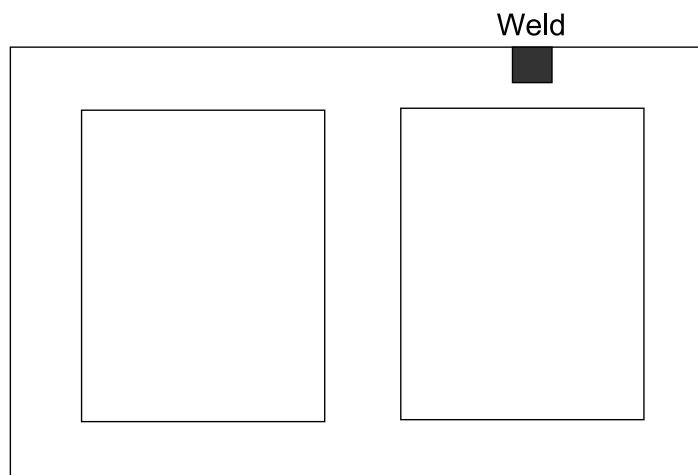
Odpor vinutí:

	Rab	Rbc	Rac	RA	RB	RC
U (mV)	82	72	74	190	190	200
I (d)	65	65	64	64	64	64
I (mA)	325	325	320	320	320	320
R	0,252307692	0,221538462	0,23125	0,59375	0,5938	0,625



## 5.5 Vypočítané hodnoty

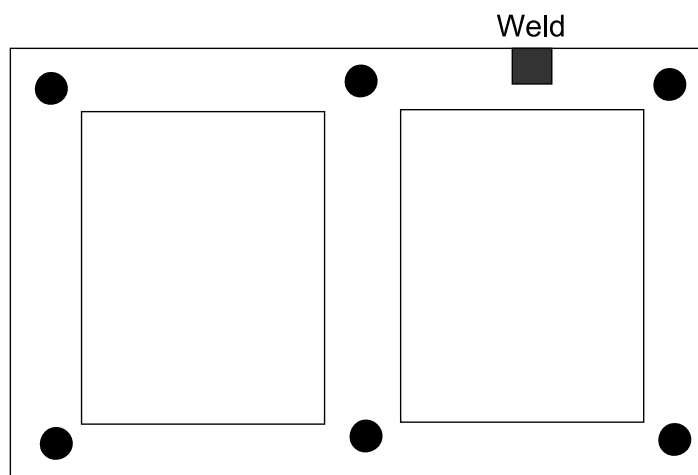
### 1.varianta- Pro magnetický obvod v původním (originálním) stavu



Obr. 5.5. Uspořádání magnetického obvodu

První měření bylo provedeno na původním transformátoru, kde v každém ze šesti míst byl umístěn jeden stahovací šroub. U tohoto měření se předpokládalo, že ztráty budou nejmenší. To se také potvrdilo, jelikož zde působí jen svár magnetického obvodu a nejsou zde žádné lícované šrouby.

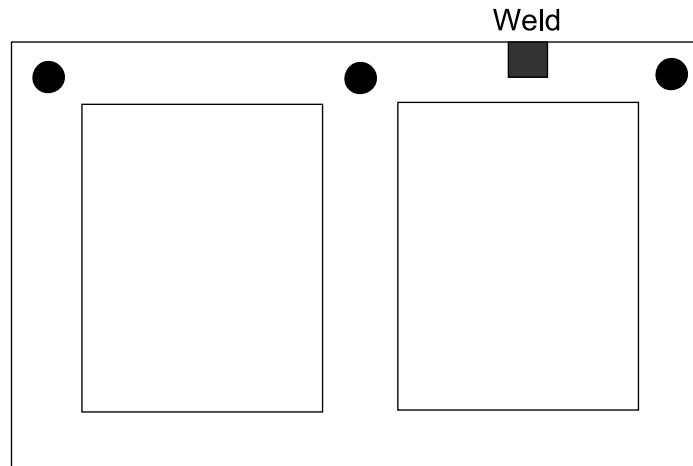
### 2.varianta- S lícovanými stahovacími šrouby



Obr. 5.6. Uspořádání magnetického obvodu

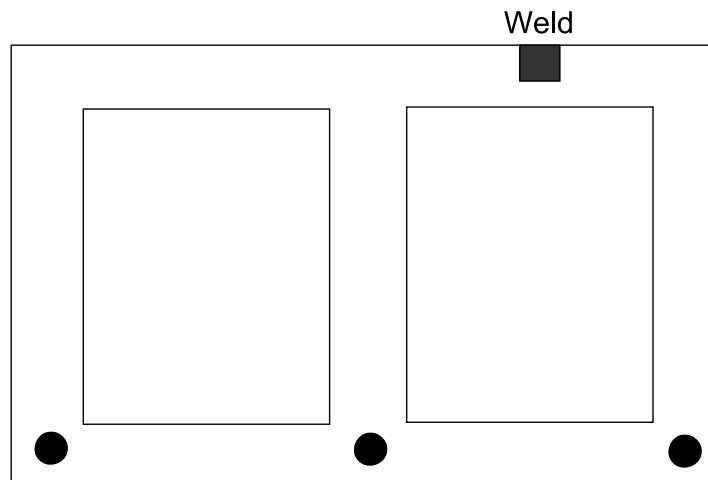
Namísto původních šroubů byly dány šrouby lícované. U tohoto měření se naopak předpokládaly ztráty vířivými proudy největší, jelikož každý ze šroubů představoval pro magnetický obvod zkrat.

### 3.varianta- 3 lícované šrouby v horní polovině transformátoru

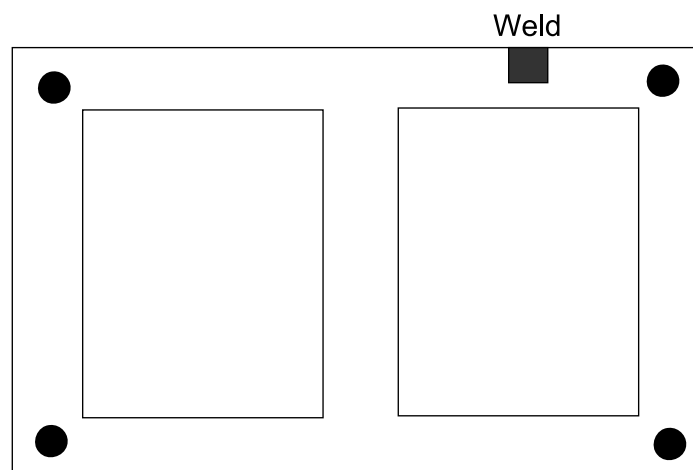


*Obr. 5.7. Uspořádání magnetického obvodu*

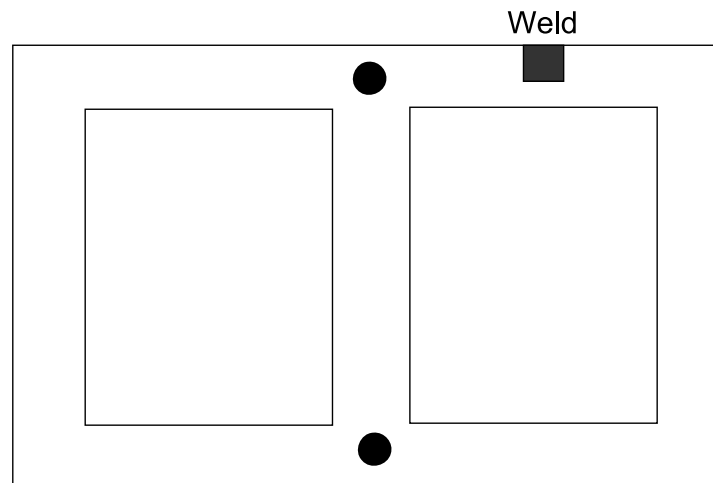
U uspořádání č. 3 byly lícované šrouby umístěny v místě černých teček, tj. v horní polovině transformátoru. Předpokládaly se ztráty menší než při použití všech lícovaných, ale větší než u originálního magnetického obvodu. Svár transformátoru také představuje zkrat pro magnetický obvod. Ztráty vyšly v porovnání všech zapojení jako druhé nejvyšší. Za to nejspíše může svár transformátoru, kdy jsou lícované šrouby a svár umístěny vedle sebe.

4.varianta- 3 lícované šrouby v dolní polovině transformátoru*Obr. 5.8. Uspořádání magnetického obvodu*

V porovnání varianty č. 3 a č. 4 jsou ztráty v tomto magnetickém obvodu menší, jelikož byly lícované šrouby se svárem rovnoměrněji rozloženy a magnetický tok nebyl tolik deformován.

5.varianta- 2 lícované šrouby v každém z postranních sloupků transformátoru*Obr. 5.9 Uspořádání magnetického obvodu*

U tohoto spojení byly použity 4 lícované šrouby, které byly umístěny v postranních sloupkách. Ztráty jsou větší než u zapojení č. 4., jelikož byly použity jen 3 lícované šrouby.

6.varianta- Dva lícované šrouby ve středním sloupku

*Obr. 5.10. Uspořádání magnetického obvodu*

Nakonec bylo odměřeno zapojení se dvěma umístěnými lícovanými šrouby ve středním sloupku magnetického obvodu. Zde je patrné, že na použití dvou lícovaných šroubů jsou ztráty dosti velké. Příčinou toho je umístění lícovaných šroubů ve středním sloupku, kde se uzavírá největší tok, a tak zde zkrat magnetického obvodu způsobí nejvíce ztrát ( na jeden lícovaný šroub ) .

## 5.6 Výpočty

### 5.6.1 Měření naprázdno

Příklad výpočtu pro  $U_0=391$  V (Příloha 1):

$$K_{mtp} = 0,2$$

$$U_0 = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{3} = \frac{390 + 391 + 392}{3} = 391 \text{ V} \quad (5.1.)$$

$$I_0 = \left( \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} \right) \cdot K_{mtp} = \left( \frac{0,87 + 0,88 + 1,25}{3} \right) \cdot 0,2 = 0,2 \text{ A} \quad (5.2.)$$

$$\Delta P_0 = (P_1 + P_2 + P_3) \cdot K_{mtp} = (75 + 148 + 162) \cdot 0,2 = 77 \text{ W} \quad (5.3.)$$

$$\cos \varphi = \frac{\Delta P_0}{3 \cdot U_0 \cdot I_0} = \frac{77}{3 \cdot 391 \cdot 0,2} = 0,328 \quad (5.4.)$$

$$\Delta P_j = \frac{3}{2} \cdot R_s \cdot I_0^2 = 3 \cdot R_1 \cdot I_0^2 = 3 \cdot 0,604 \cdot 0,2^2 = 0,0725 \text{ W} \quad (5.5.)$$

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_0 - \Delta P_j = 77 - 0,0725 \cong 76,93 \text{ W} \quad (5.6.)$$

Pro hodnoty odečtené z grafů (5.12.), (5.13.)  $\cos \varphi_{0n}$  a  $I_{0n}$  při  $U_{0n} = 380$  V platí:

$$I_{0n} = 0,187 \text{ A}$$

$$\cos \varphi_{0n} = 0,341$$

$$R_{Fe} = \frac{(U_{0n})^2}{\Delta P_{Fe}} = \frac{380^2}{72,6} = 1988,98 \ \Omega \quad (5.7.)$$

$$I_\mu = I_{0n} \cdot \sin \varphi_{0n} = 0,187 \cdot 0,94 = 0,1758 \text{ A} \quad (5.8.)$$

$$X_\mu = \frac{U_{0n}}{I_\mu} = 2161,55 \ \Omega \quad (5.9.)$$

## 5.6.2 Měření nakrátko

Příklad výpočtu pro  $U_K = 4,07 \text{ V}$  (Příloha 2):

$$U_k = \frac{U_{1k} + U_{2k} + U_{3k}}{3} = \frac{3,7 + 4,3 + 4,2}{3} = 4,07 \text{ V} \quad (5.10.)$$

$$I_k = \frac{I_{1k} + I_{2k} + I_{3k}}{3} = \frac{4,5 + 4,5 + 5}{3} = 4,67 \text{ A} \quad (5.11.)$$

$$\Delta P_k = P_1 + P_2 = 22,5 + 15 = 37,5 \text{ W} \quad (5.12.)$$

$I_{kn} = 5,23 \text{ A}$ , odečtené hodnoty:  $U_{kn} = 4,55 \text{ V}$ ,  $\cos\varphi_{kn} = 0,5747$

$$u_k\% = \frac{U_{kn}}{U_n} \cdot 100 = \frac{4,55}{420} \cdot 100 = 1,083\% \quad (5.13.)$$

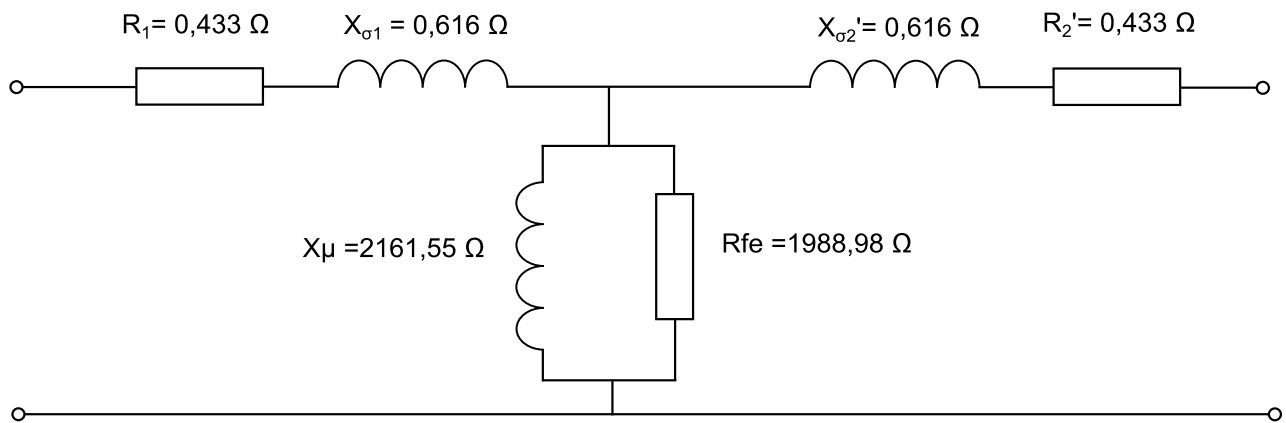
$$Z_k = \frac{U_{kn} \cdot \sqrt{3}}{I_{kn}} = \frac{4,55 \cdot \sqrt{3}}{5,23} = 1,507 \Omega \quad (5.14)$$

$$R_k = Z_k \cdot \cos\varphi_{kn} = 1,507 \cdot 0,5747 = 0,866 \Omega \quad (5.15)$$

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2} = \frac{0,866}{2} = 0,433 \Omega \quad (5.16)$$

$$X_k = Z_k \cdot \sin\varphi_{kn} = 1,507 \cdot 0,818 = 1,233 \Omega \quad (5.17)$$

$$X_{1\sigma} = X_{2\sigma}' = \frac{X_k}{2} = \frac{1,233}{2} = 0,616 \Omega \quad (5.18)$$



Obr. 5.11. Náhradní schéma transformátoru

## 5.7 Výpočet úbytku napětí

$$Z_{1n} = \frac{U_{1n}}{I_{1n}} = \frac{420}{5,23} = 80,31 \, \Omega \quad (5.19)$$

$$Z_{2n} = \frac{U_{2n}}{I_{2n}} = \frac{230}{15,73} = 14,62 \, \Omega \quad (5.20)$$

$$r_1 = \frac{R_1}{Z_{1n}} = \frac{0,6042}{80,31} = 0,0075 \quad (5.21)$$

$$r_2 = \frac{R_2}{Z_{2n}} = \frac{0,235}{14,62} = 0,0161 \quad (5.22)$$

$$r_k = r_1 + r_2 = 0,0075 + 0,0161 = 0,0236 \quad (5.23)$$

$$x_1 = \frac{X_{1\sigma}}{Z_{1n}} = \frac{0,616}{80,31} = 0,00767 \quad (5.24)$$

$$x_2 = \frac{X_{2\sigma}}{Z_{2n}} = \frac{0,616}{14,62} = 0,04213 \quad (5.25)$$

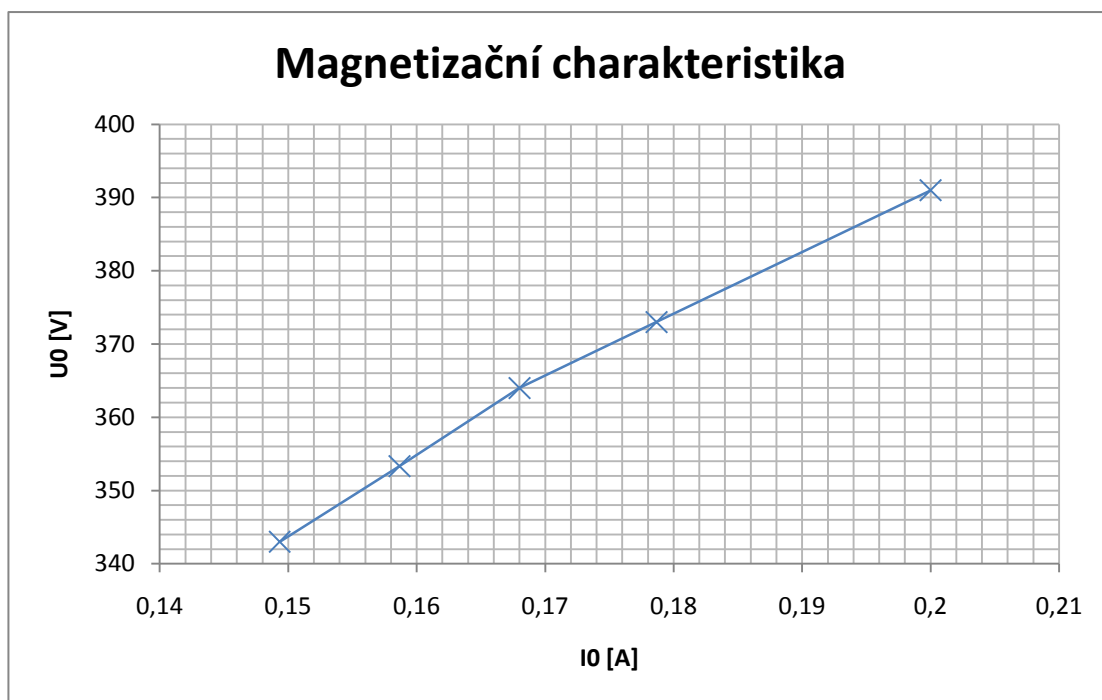
$$x_k = x_1 + x_2 = 0,00767 + 0,04213 = 0,0498 \quad (5.26)$$

$$\begin{aligned} \Delta u &= (r_k \cos \varphi + x_k \sin \varphi) \cdot i + \frac{(x_k \cos \varphi + r_k \sin \varphi)^2}{2u_1} \cdot i^2 \\ &= 0,0236 + 0,00124 = 0,02484 \end{aligned} \quad (5.27)$$

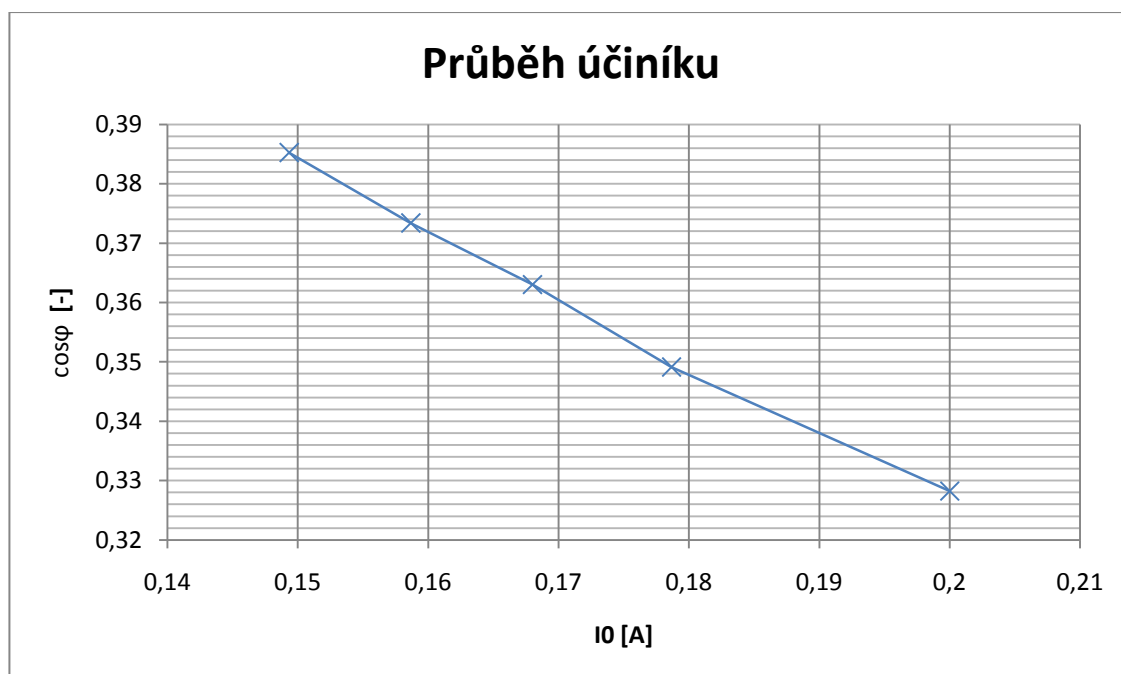
$$\Delta U = \Delta u \cdot U_n = 0,02484 \cdot 230 = 5,713 \, V \quad (5.28)$$



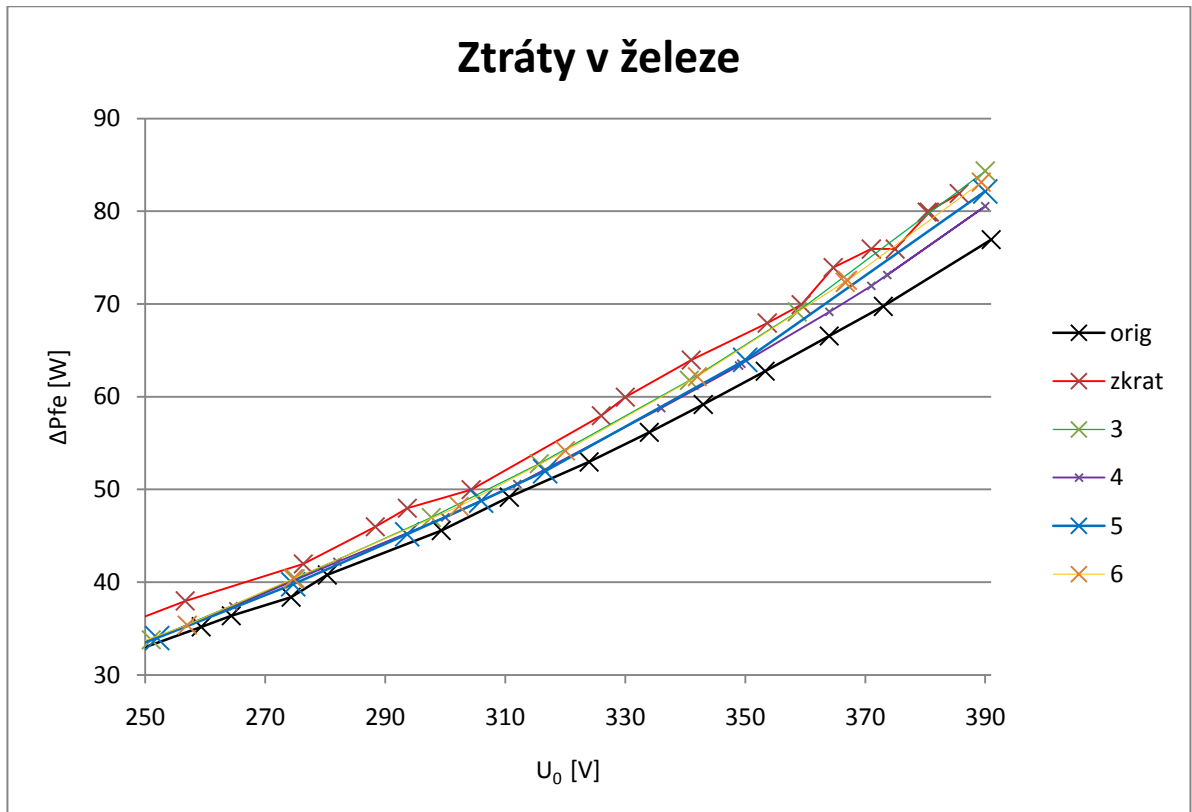
## 5.8 Grafy



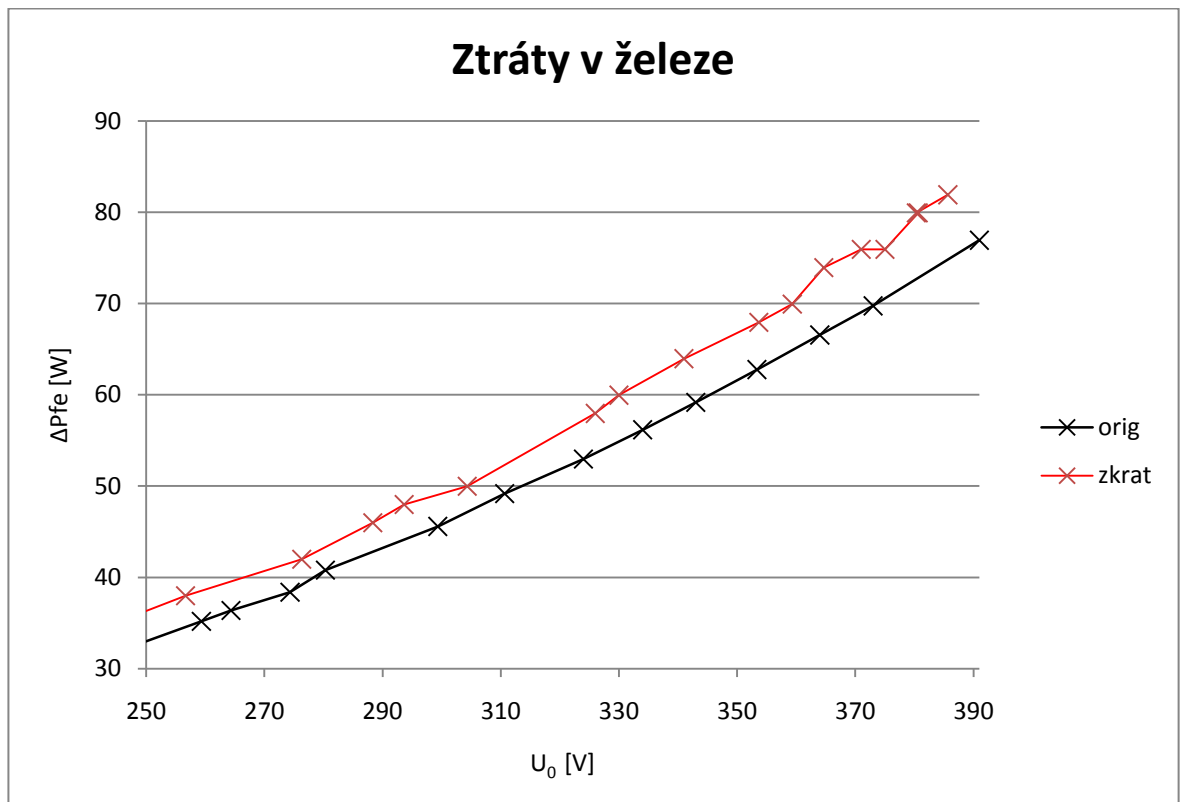
Obr. 5.12. Detail magnetizační charakteristiky transformátoru v okolí jmenovitého napětí



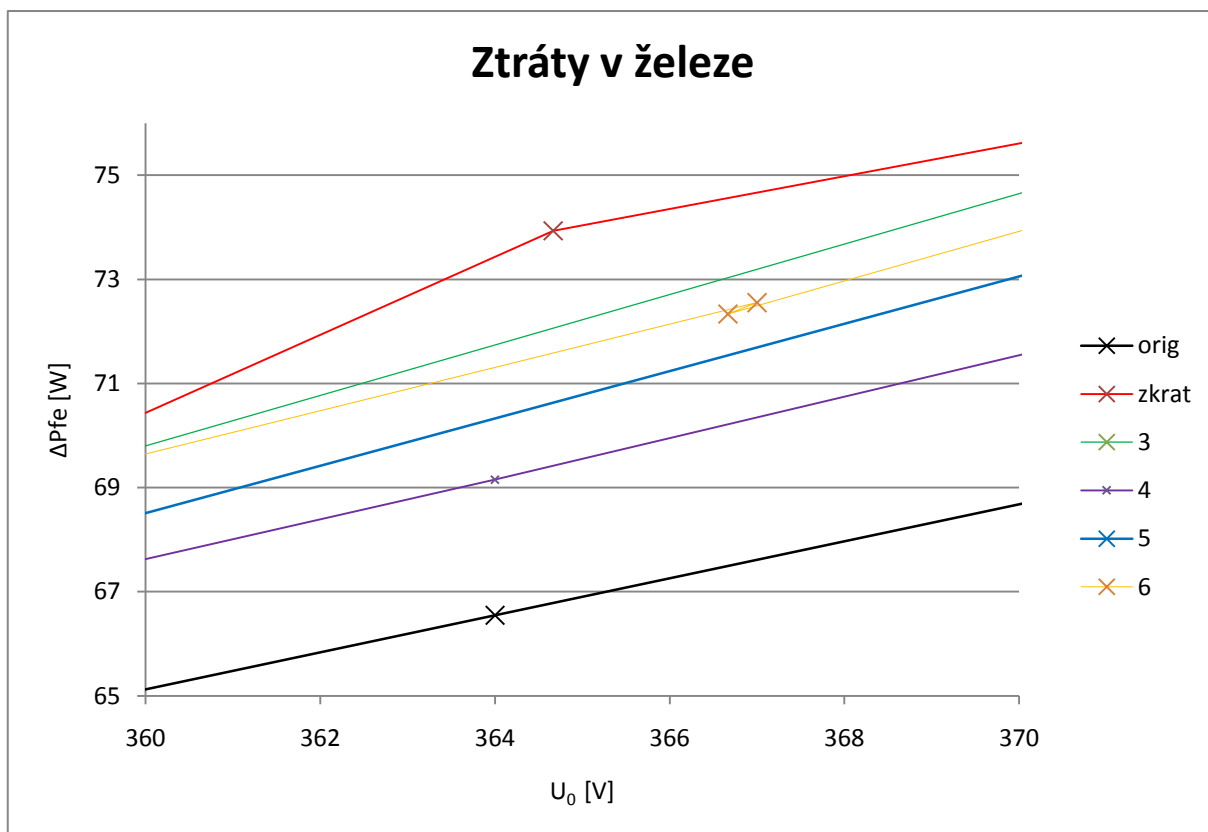
Obr. 5.13. Detail průběhu účinníku



Obr. 5.14. Detail porovnání ztrát jednotlivých uspořádání magnetického obvodu



Obr. 5.15. Detail porovnání ztrát s izolovanými stahovacími šrouby a se zkratovaným magnetickým obvodem



Obr. 5.16. Detail porovnání ztrát jednotlivých uspořádání magnetického obvodu v blízkosti jmenovitého napětí

## Závěr

Celkem bylo provedeno sedm měření na transformátoru. Šest měření naprázdno v různých kombinacích šroubů lícovaných a originálních. Měření naprázdno bylo provedeno za použití přístroje DMK 32. Nakonec byl změřen transformátor nakrátko pomocí Aronova zapojení.

Při použití stahovacích šroubů lícovaných, transformátor vykazuje větší ztráty než při normálním chodu, tj. při použití stahovacích šroubů izolovaných. Naopak jsou zde nepatrné rozdíly mezi jednotlivými variantami (3-6). Mezi těmito zapojeními magnetického obvodu je rozdíl ztrát naprázdno při jmenovitém napětí přibližně 2W. Příčinou toho je to, že jako zkrat magnetického obvodu působí jen malá plocha a transformátor má malý výkon (6,5 KVA). Lze tedy říci, že to, kde jsou použity lícované šrouby a kde ne, má velmi malý vliv na ztráty transformátoru naprázdno. Naopak je tomu v krajních případech, tj. u transformátoru v původním stavu a s použitými šesti lícovanými šrouby, kde je rozdíl ztrát naprázdno okolo 7 W.

Při jmenovité hodnotě napětí byly vypočítány a odečteny hodnoty z grafů. Ztráty naprázdno  $\Delta P_{0n} = 72,6 \text{ W}$ , ztráty nakrátko  $\Delta P_{kn} = 23,69 \text{ W}$  a úbytek napětí  $\Delta U = 5,71 \text{ V}$ .

Potvrdily se teoretické předpoklady, kdy při chodu nakrátko nebyl magnetický obvod transformátoru nasycen. Ztráty se tak z větší části skládaly ze ztrát Joulových. Při měření naprázdno tomu bylo naopak, ztráty v železe se téměř rovnaly ztrátám naprázdno. Z naměřených a vypočtených hodnot lze usoudit, že transformátor je dosti tvrdým zdrojem s vysokou účinností, tedy malým úbytkem napětí.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] 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.
- [2] PETROV, Georgij N. *Elektrické stroje 1: úvod-transformátory*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1980. 385 s.
- [3] BARTOŠ, Václav, SKALA, Bohumil. *Měření na elektrických strojích*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 110 s. ISBN 80-7043-447-3.
- [4] KOPYLOV, Igor Petrovič aj. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 685 s.
- [5] MĚŘIČKA, Jiří, HAMATA, Václav a VOŽENÍLEK, Petr. *Elektrické stroje*. Vyd. 2, dotisk. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. 311 s. ISBN 80-01-02109-2
- [6] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. 1,2. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 1986. 240 s.
- [7] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a cívký*. BEN- technická literatura, Praha 1999. Vyd.1. 400 s. ISBN 80-86056-49-X
- [8] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 1995. 221 s. ISBN 80-7082-221-X
- [9] HEŘMAN, Josef a kol. *Příručka silnoproudé elektrotechniky*. SNTL- nakladatelství technické literatury, Praha 1986. 1028 s.
- [10] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. SNTL, Praha II 1958. 716 s.
- [11] CIGÁNEK, Ladislav, BAUER, Miroslav. *Elektrické stroje a přístroje*. 2.vyd. SNTL- Praha 1957. 640 s.
- [12] BAŠTA, Jan, CHLÁDEK, Jaroslav, MAYER, Imrich. *Teorie elektrických strojů*. 1.vyd. SNTL- Praha 1968. 584 s.
- [13] HRUŠKOVIČ, Ladislav. *Elektrické stroje*. Slovenská technická univerzita v Bratislave 1999. 497 s. ISBN 80-227-1249-3
- [14] KONÍČEK, Václav, *Elektrické stroje*. [online] Dostupné z: <http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/download/studium/vos/el-stroje-a-pristroje/transformatory.pdf>
- [15] BARTOŠ, Václav, ČERVENÝ, Josef, HRUŠKA, Josef, KOTLANOVÁ, Anna, SKALA, Bohumil, *Elektrické stroje*, Fakulta elektrotechnická Plzeň 2006, 140 s., ISBN 80-7043-444-9
- [16] [online] [cit. 2014-05-15] Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/cotav010608>
- [17] [online] [cit. 2014-05-15] Dostupné z: <http://motor.feld.cvut.cz/www/materialy/AD1B14SP1/EMM-p-3-45-67---T.doc>
- [18] Konstrukce suchých zalévaných transformátorů [online] [cit. 2014-05-28] Dostupné z: <http://www.trasfor.sk/documents/Konstrukce.pdf>

## Přílohy

### Příloha 1 : Naměřené hodnoty při měření naprázdno:

Pro transformátor v původním stavu:

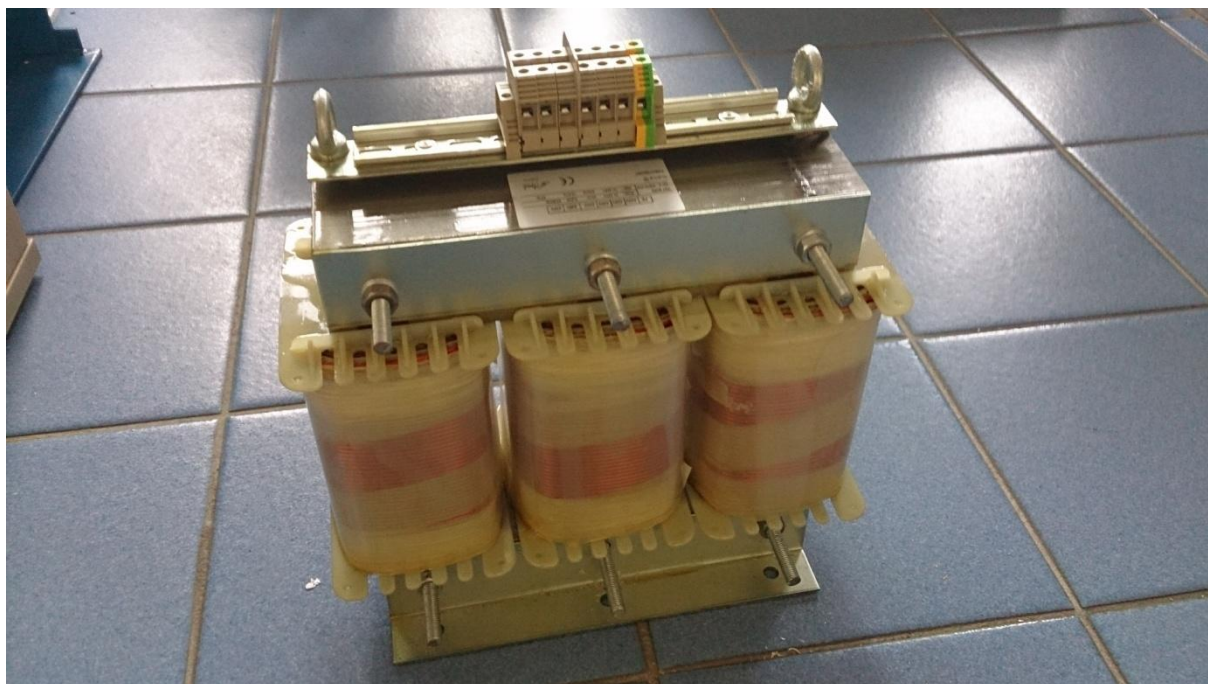
01 - V L1- L2 [V]	01 - V L2- L3 [V]	01 - V L3- L1 [V]	01 - A L1 [A]	01 - A L2 [A]	01 - A L3 [A]	01 - W L1 [W]	01 - W L2 [W]	01 - W L3 [W]
390	391	392	0,87	0,88	1,25	75	148	162
372	373	374	0,77	0,79	1,12	70	132	147
363	364	365	0,72	0,74	1,06	68	124	141
353	353	354	0,68	0,7	1	65	116	133
342	343	344	0,64	0,66	0,94	62	108	126
333	334	335	0,6	0,63	0,9	60	102	119
323	324	325	0,57	0,59	0,85	57	95	113
310	311	311	0,53	0,55	0,79	53	88	105
299	299	300	0,5	0,52	0,75	50	81	97
280	280	281	0,46	0,48	0,69	46	71	87
274	274	275	0,44	0,46	0,67	43	67	82
264	264	265	0,42	0,45	0,64	41	63	78
259	259	260	0,42	0,44	0,63	40	61	75
247	247	248	0,4	0,42	0,6	37	56	69
237	237	238	0,38	0,4	0,58	34	51	64
226	226	227	0,37	0,38	0,55	32	47	59
216	217	217	0,35	0,37	0,53	30	43	55
205	206	207	0,34	0,35	0,51	27	40	51
195	196	197	0,33	0,34	0,49	25	36	46
183	184	184	0,31	0,32	0,47	22	32	41
169	169	170	0,29	0,3	0,44	19	28	36
156	157	157	0,28	0,29	0,42	17	24	31
149	150	150	0,27	0,28	0,41	15	23	29
141	142	142	0,26	0,27	0,39	14	21	26
134	134	134	0,25	0,26	0,38	13	19	24
125	126	126	0,24	0,25	0,36	11	17	22
114	115	115	0,23	0,23	0,34	10	14	18
98	99	99	0,21	0,21	0,32	7	11	14
90	90	91	0,2	0,2	0,3	6	10	12
74	74	74	0,18	0,18	0,27	4	7	9
60	60	61	0,16	0,16	0,24	3	5	6
48	48	48	0,14	0,14	0,21	2	3	4
40	40	40	0,13	0,12	0,19	1	2	3
27	28	27	0,1	0,1	0,15	1	1	1

**Příloha 2: Naměřené hodnoty při měření nakrátko**

I1 [A]	2,7	3,5	4	4,5
I2 [A]	2,8	3,5	4,05	4,5
I3 [A]	2,85	3,95	4,35	5
Uab [V]	2,2	2,8	3,4	3,7
Ubc [V]	2,3	3,3	3,7	4,3
Uac [V]	2,3	3,3	3,7	4,2
W1 [d]	4	6	7	9
W2 [d]	2	2	5	6
W1 [W]	10	15	17,5	22,5
W2 [W]	5	5	12,5	15

**Příloha 3: Štítek transformátoru**

#### Příloha 4: Transformátor



#### Příloha 5: Šroub v původním stavu

