

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Vliv nesymetrického zatížení na chod trojfázových  
transformátorů**  
**Effects of Unbalanced Load on Operation of Three-Phase  
Transformers**

**2015**

**Martin Konečný**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Konečný**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika  
Téma: **Vliv nesymetrického zatížení na chod trojfázových transformátorů**  
**Effects of Unbalanced Load on Operation of Three-Phase Transformers**

Zásady pro vypracování:

- 1) Teoretický rozbor provozu transformátoru
- 2) Rozbor a způsoby řešení nesymetrického zatížení trojfázových transformátorů
- 3) Měření na trojfázovém transformátoru s nesymetrickým zatížením
- 4) Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- 1) Petrov, G.N.-Elektrické stroje 2, Academia 1982
- 2) Jezierski, E.- Transformátory-Teoretické základy, Academia 1973
- 3) Bašta, J.; Chládek, J.; Mayer, I.- Teorie elektrických strojů, SNTL 1968
- 4) Hrabovcová, V. a kol.- Meranie a modelovanie elektrických strojov, Žilina

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Čech, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.



podpis

V Ostravě dne 7.5.2015

Martin Konečný

## **Poděkování**

Zejména bych chtěl poděkovat panu Ing. Václavu Čechovi, Ph.D., panu Ing. Stanislavu Rusnokovi a panu Ing. Pavlu Sobotovi za velmi cenné rady při psaní této práce, ochotu a jejich čas.

## **Abstrakt**

Tématem této bakalářské práce je analýza trojfázového transformátoru při nesymetrickém zatížení. Nejprve je popsán transformátor principiálně a jeho vlastnosti v provozních stavech i teoretický popis nesymetrického zatížení. Další část práce je zaměřena na měření provozních stavů transformátoru a měření netočivé složky impedance. V poslední kapitole je rozbor trojfázového transformátoru při nesymetrickém zatížení. V laboratoři byla provedena čtyři měření v základních zapojeních. Z každého měření byly vytvořeny tabulky s výsledky, dle kterých jsme schopni určit chování transformátoru při nesymetrickém zatížení při jednotlivých zapojení.

## **Klíčová slova**

Transformátor, impedance, magnetický tok, magnetizace, netočivá impedance, hvězda, trojúhelník, nesymetrické zatížení, měření naprázdno, měření nakrátko

## **Abstract**

The topic of this bachelor thesis is to analyze the three-phase transformer at an unbalanced load. At first the principle of the transformer and its properties in operating conditions are described along with a theoretical description of the unbalanced load. Following part is focused on measuring the operating conditions of the transformer and zero-sequence impedance measurement. In the last chapter there is an analysis of a three-phase transformer at the unbalanced load. The measurements in four basic circuits were taken in the laboratory. For each measurement, the tables with results were created. From these tables, we are able to determine the behavior of the transformer at the unbalanced load in each connection.

## **Key Words**

Transformer, impedance, magnetic flux, magnetization, zero-sequence impedance, star, delta, unbalanced load, open-circuit test, short-circuit test

## Seznam některých použitých symbolů a značek

$R_{Fe}$ .....	Ztráty v železe ( $\Omega$ )
$X_{\mu}$ .....	Magnetizační reaktance ( $\Omega$ )
$I_1$ .....	Proud na primární straně (A)
$I'_2$ .....	Proud na sekundární straně (A)
$U'_2$ .....	Napětí na sekundární straně (V)
$U_1$ .....	Napětí na primární straně (V)
$u, v, w$ .....	Svorky sekundárního vinutí
$U, V, W$ .....	Svorky primárního vinutí
$Z$ .....	Zátěžová impedance ( $\Omega$ )
$\Phi_{1\sigma}$ .....	Rozptylový magnetický tok (Wb)
$\Phi_{1h}$ .....	Hlavní magnetický tok (Wb)
$\Phi$ .....	Magnetický tok (Wb)
$I_{\mu}$ .....	Magnetizační proud (A)
$I_{Fe}$ .....	Ztrátový proud (A)
$X_{1\sigma}$ .....	Rozptylová reaktance na primární straně ( $\Omega$ )
$X'_{2\sigma}$ .....	Rozptylová reaktance na sekundární straně ( $\Omega$ )
$R_1$ .....	Odpor vinutí primární strany ( $\Omega$ )
$R_2$ .....	Odpor vinutí sekundární strany ( $\Omega$ )
$U_0$ .....	Napětí naprázdno (V)
$I_0$ .....	Proud naprázdno (A)
$\cos\varphi_0$ .....	Účinitel naprázdno (-)
$p$ .....	Převod transformátoru (-)
$Z_0$ .....	Impedance naprázdno ( $\Omega$ )
$\Delta P_0$ .....	Ztráty transformátoru naprázdno (W)
$U_k$ .....	Napětí nakrátko (V)
$I_k$ .....	Proud nakrátko (A)
$\cos\varphi_k$ .....	Účinitel nakrátko (-)
$Z_k$ .....	Impedance nakrátko ( $\Omega$ )
$uk_{\%}$ .....	Procentní napětí nakrátko (%)
$\Delta P_k$ .....	Ztráty transformátoru nakrátko (W)
$N_1, N_2$ .....	Počet závitů primárního a sekundárního vinutí
$U_U, U_V, U_W$ .....	Fázové napětí na primární straně (V)
$U_{UV}, U_{UW}, U_{VW}$ .....	Sdružené napětí na primární straně (V)
$U_u, U_v, U_w$ .....	Fázové napětí na sekundární straně (V)
$U_{uv}, U_{uw}, U_{vw}$ .....	Sdružené napětí na sekundární straně (V)
$I_U, I_V, I_W$ .....	Naměřené proudy na U, V, W (A)
$I_{(0)}$ .....	Proud netočivé složky (A)
$Z_{(0)}, Z_{(1)}, Z_{(2)}$ .....	Nulová, sousledná a zpětná impedance ( $\Omega$ )

# Obsah

Úvod .....	9
1. Transformátory .....	10
1.1. Definice, použití a princip transformátoru.....	10
1.1.1 Definice a použití transformátoru.....	10
1.1.2 Princip činnosti transformátoru .....	10
1.2. Konstrukce transformátoru.....	11
1.2.1. Magnetický obvod.....	12
1.2.2. Vinutí.....	13
1.3. Rovnice transformátoru .....	14
1.4. Provozní stavy transformátoru .....	16
1.4.1. Chod naprázdno .....	16
1.4.2. Chod nakrátko .....	17
1.4.3. Chod při zatížení.....	18
1.5. Nesymetrické zatížení transformátorů .....	19
2. Měření na transformátoru .....	21
2.1. Měření naprázdno.....	21
2.2. Měření nakrátko:.....	24
2.3. Měření netočivé impedance $Z_{(0)}$ .....	27
2.4. Náhradní schéma transformátoru: .....	29
3. Nesymetrické zatížení transformátorů .....	32
3.1. Chod nakrátko v zapojení $Y_y$ .....	32
3.1.1. Charakteristické znaky spojení $Y_y$ .....	32
3.1.2. Dvojpólový chod nakrátko $Y_y$ .....	33
3.1.3. Jednopolový chod nakrátko $Y_y$ .....	34
3.2. Chod nakrátko v zapojení $D_y$ .....	36
3.2.1. Charakteristické znaky spojení $D_y$ .....	36
3.2.2. Dvojpólový chod nakrátko $D_y$ .....	37
3.2.3. Jednopolový chod nakrátko $D_y$ .....	38
Závěr.....	40
Seznam literatury a informačních zdrojů .....	41



## Úvod

Úvodem bych rád krátce popsal vliv nesymetrického zatížení trojfázových transformátorů. Jednotlivé fáze transformátoru nemusí být shodně zatížené, a tak dochází k nesouměrnosti zatížení, která například způsobuje snížení výkonu u trojfázových motorů.

Tato bakalářská práce je rozdělena do tří hlavních kapitol. Hned první kapitola pojednává obecně o transformátorech. Co je to transformátor a jak vlastně funguje. Dále je stručně popsána konstrukce, základní rovnice, provozní stavy a samotné nesymetrické zatížení transformátoru. Ve druhé kapitole se věnuji měření provozních stavů transformátoru naprázdno a nakrátko, netočivé složky impedance a výpočtem náhradního schématu transformátoru. Třetí kapitola je věnována měření nesymetrického zatížení transformátoru v nejčastějších případech zapojení.

Cílem této bakalářské práce je při nesouměrném zatížení transformátoru zjistit, jaké jsou jeho vlastnosti.

# 1. Transformátory

## 1.1. Definice, použití a princip transformátoru

### 1.1.1 Definice a použití transformátoru

Transformátor je definován jako netočivý elektromagnetický stroj, převádějící bez pohybu elektromagnetickou indukci střídavé nebo přerušované proudy, přiváděné do jedné obvodu ve střídavé proudy nebo proudové impulsy odebírané z druhých obvodů. Přenos elektrické energie transformátorem je možný v obou směrech, avšak většinou je transformátor používán v jednom směru energie. Z tohoto hlediska lze rozdělit transformátory na[6]:

- a) Zvyšovací
- b) Snižovací
- c) S přenosem energie v obou směrech.

Do první skupiny patří elektrárenské transformátory dvouvinuťové nebo s více vstupními vinutími napájenými z různých generátorů. Vyznačují se velkým výkonem (stovky MVA) a velkým výstupním napětím (stovky kVA).[6]

Do druhé skupiny patří transformátory síťové s výkonem desítek až stovek MVA, které snižují velmi vysoké napětí hlavní přenosové sítě (220kV, 400kV) na vysoké napětí (22kV, 35kV), a dále transformátory distribuční s výkonem desítek až stovek kVA, které tvoří nejpočetnější skupinu energetických transformátorů, neboť snižují vysoké napětí na nízké.[6]

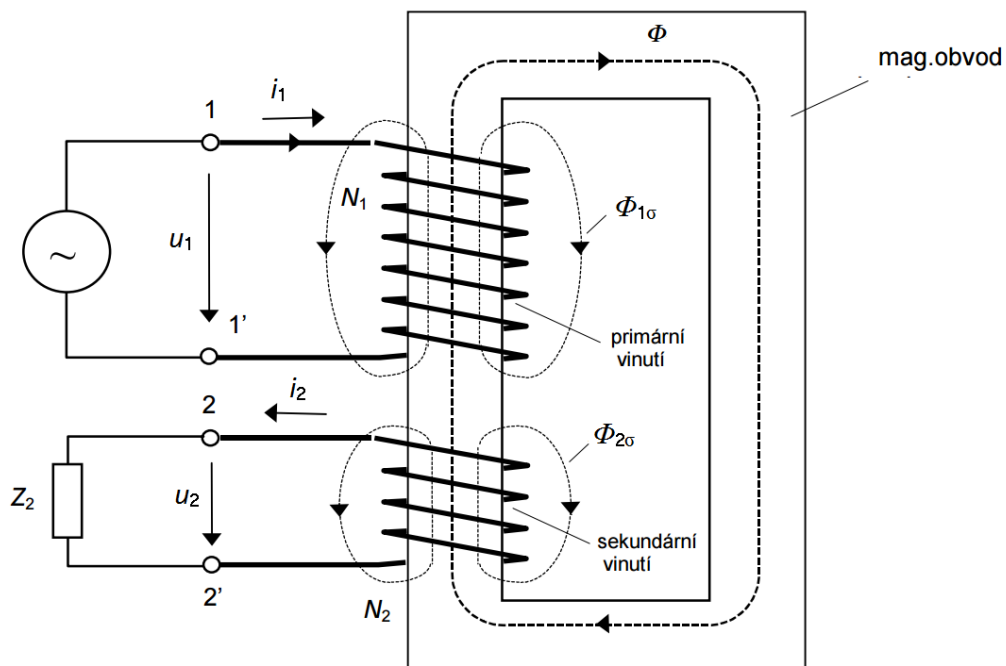
Ve třetí skupině jsou tzv. spojovací transformátory umožňující spojení dvou nezávislých sítí (např. 400kV a 220kV), čímž docílíme hospodárné využití výkonu z jedné soustavy do druhé a naopak. Tyto transformátory jsou v současnosti vyráběny jako autotransformátory. [6]

### 1.1.2 Princip činnosti transformátoru

Pojmem transformátor rozumíme dvě cívky, které jsou navzájem magneticky vázané. V okamžiku, kdy připojíme časově proměnlivé napětí (obvykle harmonické  $u_1 = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin \omega t$ ) na jednu z cívek (např. primární), začne jí protékat časově proměnlivý proud  $i_1$ . Ten vybudí v magnetickém obvodu časově proměnlivý magnetický tok  $\Phi_1$ . Jeho indukční čáry vážou závity obou cívek, tedy i závity druhé cívky a indukují v ní (harmonické) napětí  $u_2$ . Pakliže je na tuto druhou cívku připojen spotřebič (zátěžová impedance  $Z$ ), poteče sekundárním obvodem proud  $i_2$ , který vytvoří magnetický tok (reakční)  $\Phi_2$ . Oba toky se sčítají (jako fázory) a pro výsledný (společný tok) platí[5]:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 \quad (1.1)$$

Magnetický tok  $\Phi_1$  má dvě složky – hlavní tok  $\Phi_{1h}$ , který se uzavírá jádrem (a zabírá se sekundární cívkou) a tzv. rozptylový tok  $\Phi_{1\sigma}$ , který se uzavírá pouze kolem primární cívky a nepodílí se tedy na přenosu energie. Totéž platí pro magnetický tok  $\Phi_2$ . [5]

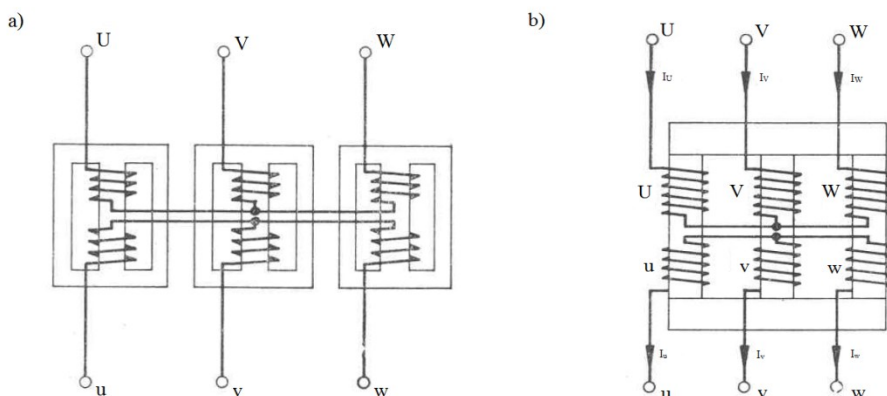


Obr. 1.1 Nákres jednofázového transformátoru[7]

## 1.2. Konstrukce transformátoru

Při transformaci trojfázového proudu se používají dva druhy transformátorů:

1. Jednofázové, zapojené samostatně do každé ze tří fází
2. Trojfázové, které mají jeden společný trojfázový magnetický obvod pro vinutí všech tří fází. [4]



Obr. 1.2 Druhy trojfázových transformátorů[4]  
a) Trojfázová skupina tří jednofázových transformátorů  
b) Transformátor s trojfázovým magnetickým obvodem

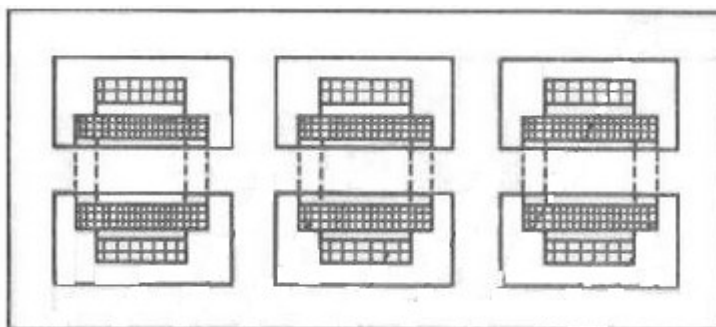
### 1.2.1. Magnetický obvod

Transformátory dle koncepce magnetického obvodu dělíme na plášťové a jádrové.

#### Trojfázové plášťové transformátory:

Trojfázové plášťové transformátory můžeme považovat za tři plášťové jednofázové transformátory, vzájemně spojené magnetickými spojkami.[1]

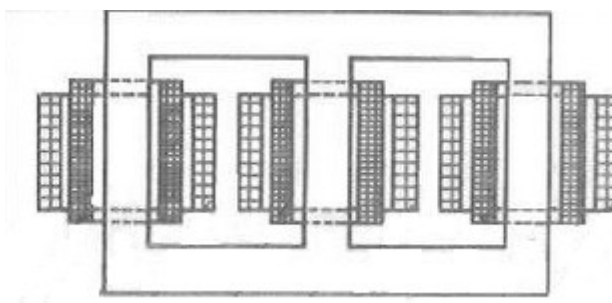
Amplitudy magnetických toků ve vnějších částech magnetického obvodu se rovnají poloviční amplitudě toků v jádrech. Tok společných spojkových částí je závislý na způsobu spojení fází. Při spojení vinutí do hvězdy, zapojením např. začátků vinutí do nulového bodu, jsou magnetické toky společných spojkových částí  $\sqrt{\frac{3}{2}}\Phi$ , přičemž  $\Phi$  je tok v jádře. V praxi obvykle obracíme střední fázi (nule je vytvořena spojením začátků vinutí první a třetí fáze a konce druhé fáze). Zmenší se tím tok v částích spojek na hodnotu  $\frac{1}{2}\Phi$ . Tím je dále dán menší průřez, a tedy i méně aktivního železa transformátoru. [1]



Obr. 1.3 Plášťový transformátor[8]

#### Trojfázové jádrové transformátory:

Trojfázové jádrové transformátory můžeme rozdělit na dvě skupiny: a) se symetrickým, b) s nesymetrickým magnetickým obvodem. [1]



Obr. 1.4 Jádrový transformátor[8]

U symetrického magnetického obvodu jsou vstupní a výstupní vinutí umístěny na každém jádře. Volná jádra jsou pak vzájemně spojena.

Nejrozšířenějším je nesymetrický systém, u něhož jsou osy jader všech fází v jedné rovině. Místo sprážených toků (tzv. magnetický uzel) vychází uprostřed spojky, následkem čehož jsou cesty toků v krajních fázích delší než prostřední fáze. Toto má za následek nesymetrii

fázových magnetizačních proudů. Avšak u hodnot sycení, s nimiž se setkáváme ve stavbě transformátorů, nemá tato nesymetrie záporný vliv na jeho funkci.[1]

Nesymetrických způsobů provedení nesymetrických obvodů je spousta. Například pár uvedených: trojfázový magnetický obvod s plechy přeplátovanými pod úhlem  $90^\circ$ , magnetický obvod s plechy přeplátovanými pod úhlem  $45^\circ$ , trojfázový magnetický obvod dvourámový nebo trojfázový magnetický obvod složený ze tří navinutých rámců apod.

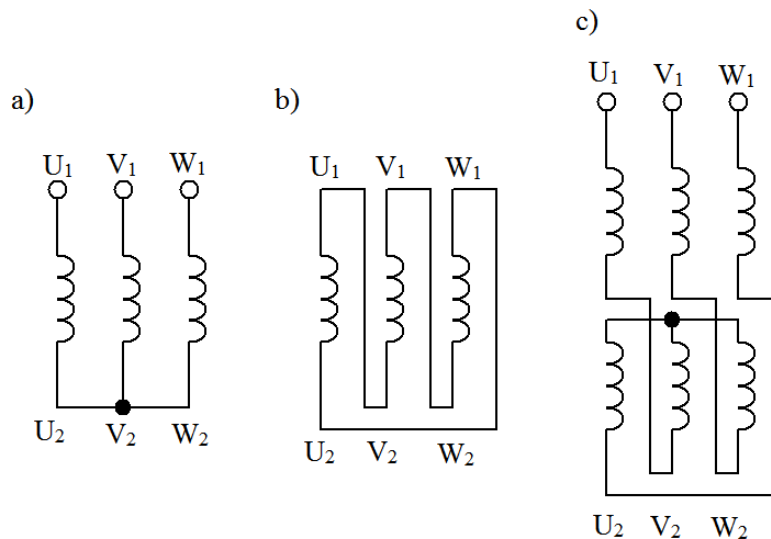
### 1.2.2. Vinutí

Vinutí se dělá z izolovaného vodiče měděného nebo hliníkového, na izolačních válcích z tvrzeného papíru. Jako izolace se používá papír ve více vrstvách. U vzduchových transformátorů se používá skelné izolace vodičů. [2]

Transformátor, ať jednofázový nebo vícefázový, má v každé fázi, tj. též na každém jádře, nejméně dvojí vinutí. Výjimku tvoří svářecí transformátory a jim podobné zkratu vzdorné transformátory. Jedním z vinutí, které nazveme vstupním nebo též primárním, elektrický výkon vstupuje, druhým výstupním (sekundárním) opět výkon vystupuje. Transformátor může však mít tři nebo více vinutí.[2]

#### Spojení vinutí

U trojfázových transformátorů se používají různá spojení vinutí. Nejčastěji se používají vinutí zapojená do hvězdy a trojúhelníku, méně často do lomené hvězdy. Ostatní spojení se používají jen ve zvláštních případech. Spojení do hvězdy se označuje u vinutí vyššího napětí písmenem Y, u nižšího napětí y; spojení vinutí do trojúhelníku podobně D nebo d a spojení do lomené hvězdy Z a z. Je-li vyveden nulový bod vinutí, značí se YN, ZN, yn, zn.

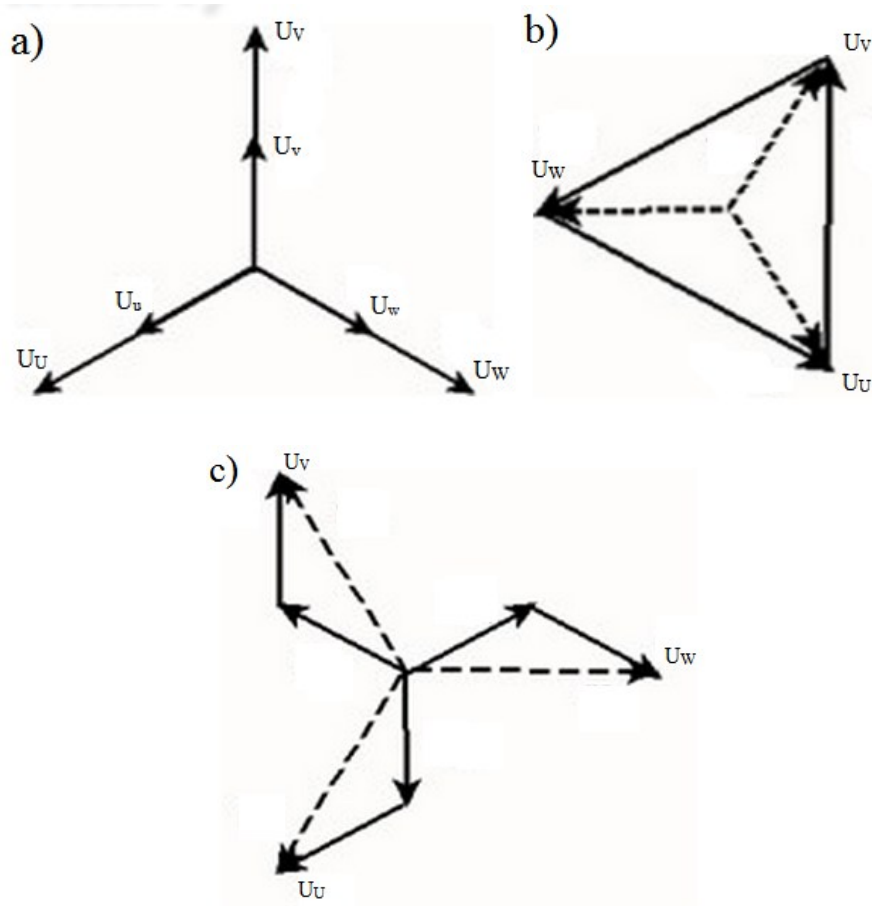


Obr. 1.5 Schéma zapojení trojfázových vinutí

a) hvězda

b) trojúhelník

c) lomená hvězda



Obr. 1.6 Fázorové diagramy zapojení trojfázových vinutí  
 a) hvězda  
 b) trojúhelník  
 c) lomená hvězda

### 1.3. Rovnice transformátoru

V náhradním schématu uvažujeme zatížení transformátoru impedancí  $Z$ , která má ohmicko-induktivní (RL) charakter. Musíme mít na paměti, že účinnost transformátoru je daný právě charakterem impedance  $Z$ . Transformátor tedy nemá svou jmenovitou hodnotu účinníku (jeho jmenovitý výkon je udáván jako zdánlivý S).

Sekundární stranu přepočítáváme na primární pomocí vztahů:

$$U'_2 = p \cdot U_2 \quad (1.2)$$

$$I'_2 = \frac{1}{p} \cdot I_2 \quad (1.3)$$

$$Z'_2 = p^2 \cdot Z_2 \quad (1.4)$$

Napětíové rovnice:

$$\underline{U}_1 = R_1 \cdot \underline{I}_1 + jX_{1\sigma} \cdot \underline{I}_1 + U_i = R_1 \cdot \underline{I}_1 + jX_{1\sigma} \cdot \underline{I}_1 + jX_\mu \cdot (\underline{I}_1 + \underline{I}'_2) \quad (1.5)$$

$$\underline{U}_2 = R'_2 \cdot \underline{I}'_2 + jX'_{2\sigma} \cdot \underline{I}'_2 + U_i = R'_2 \cdot \underline{I}'_2 + jX'_{2\sigma} \cdot \underline{I}'_2 + jX_\mu \cdot (\underline{I}_1 + \underline{I}'_2) \quad (1.6)$$

$$X_1 = X_{1\sigma} + X_\mu \quad (1.7)$$

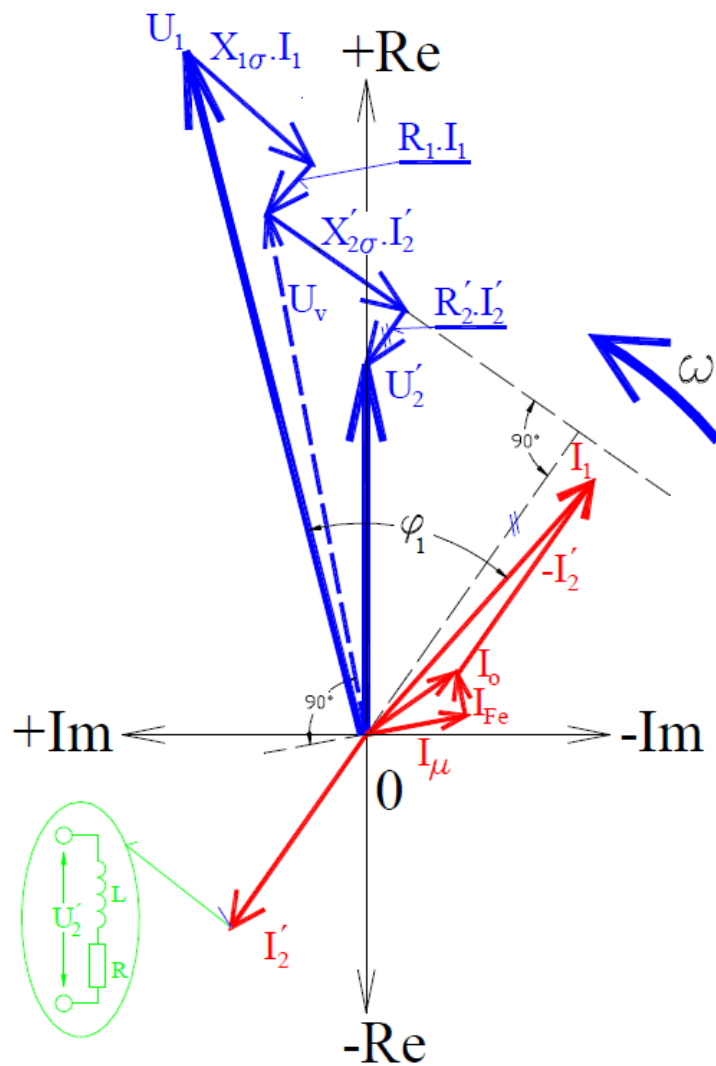
$$X'_2 = X'_{2\sigma} + X_\mu \quad (1.8)$$

Kde součet rozptylové a magnetizační reaktance nahradíme  $X_1$  a  $X'_2$ .

Napětíové rovnice po úpravě tedy jsou:

$$\underline{U}_1 = (R_1 + jX_1) \cdot \underline{I}_1 + jX_\mu \cdot \underline{I}'_2 \quad (1.9)$$

$$\underline{U}_2 = (R'_2 + jX'_2) \cdot \underline{I}'_2 + jX_\mu \cdot \underline{I}_1 \quad (1.10)$$



Obr. 1.7 Fázorový diagram ohmicko-induktivně zatíženého transformátoru

## 1.4. Provozní stavy transformátoru

Transformátor může pracovat ve dvou mezních chodech a to v chodu naprázdno a v chodu při zatížení do jmenovitého proudu (nakrátko). Jestliže dojde ke zvyšování zatěžovacího proudu, pracuje transformátor v zatíženém chodu.

### 1.4.1. Chod naprázdno

Při chodu naprázdno je proud výstupního vinutí roven nule. Stav kdy transformátor pracuje naprázdno, umožňuje určit některé vlastnosti transformátoru. Proto provádíme toto měření, při kterém napětí vstupního vinutí  $U_1$  se postupně zvyšuje až do cca  $1,15U_{1N}$ , kde  $U_{1N}$  je jmenovité vstupní napětí. Měření má být provedeno při prakticky sinusové křivce vstupního napětí a jmenovitém kmitočtu a k výstupnímu vinutí je připojen pouze voltmetr, jímž měříme napětí  $U_2$ . Do vstupního obvodu zařazujeme ampérmetr, voltmetr a wattmetr. [4]

Z naměřených hodnot, poté určíme závislosti  $I_0=f(U_0)$ ,  $P_0=f(U_0)$  a  $\cos\varphi_0=f(U_0)$ , viz. měření v kap. 2.1.

U trojfázového transformátoru se pro určení výše uvedených závislostí berou střední hodnoty  $U_0$ ,  $I_0$  z měření v jednotlivých fázích. Účinník se též určuje ze středních hodnot.[4]

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{3 \cdot U_0 \cdot I_0} \quad (1.11)$$

Z měření naprázdno můžeme vypočítat další důležité veličiny:

1. Převod

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.12)$$

2. Proud naprázdno  $I_0$

Proud naprázdno  $I_0$  se buď (v našem případě) měří, nebo lze v poměrných jednotkách vyjádřit jako:

Pro trojfázový transformátor:

$$i_0 = \frac{I_{0U} + I_{0V} + I_{0W}}{3 \cdot I_{1N}} \quad (1.13)$$

3. Impedance

$$Z_0 = \frac{U_0}{I_0} \quad (1.14)$$

4. Ztráty naprázdno

Pro trojfázový transformátor:

$$\Delta P_0 = 3 \cdot U_0 \cdot I_0 \cdot \cos\varphi_0 \quad (1.15)$$

Ztráty naprázdno můžeme pokládat za ztráty v železe.



### 1.4.2. Chod nakrátko

Při tomto stavu transformátor standardně nepracuje.

Při chodu nakrátko je napětí vstupního transformátoru  $U_2=0$ . Jestliže v provozních podmínkách při jmenovitém vstupním napětí vznikne chod nakrátko nahodile, jde o stav havarijní, neboť ve vinutí transformátoru vzniknou zvláště velké proudy.[4]

Chod nakrátko při sníženém vstupním napětí může být využit, podobně jako chod naprázdno, pro hodnocení transformátoru. Provádíme proto toto měření, při kterém svorky výstupního vinutí se spojí nakrátko a napětí vstupního vinutí  $U_1$  při jmenovitém kmitočtu se postupně zvyšuje od nuly do hodnoty, při které je proud ve vinutí roven jmenovitému. [4]

Z naměřených hodnot, poté určíme závislosti  $I_k=f(U_k), P_k=f(U_k)$  a  $\cos\varphi_k=f(U_k)$ , viz. měření v kap. 2.2.

V případě trojfázového transformátoru se uvedené charakteristiky určují ze středních hodnot napětí  $U_k$  a proudů  $I_k$  ve třech fázích. Účinník se také určí ze středních naměřených veličin.[4]

$$\cos\varphi_k = \frac{P_k}{3 \cdot U_k \cdot I_k} \quad (1.16)$$

Z měření nakrátko můžeme vypočítat další důležité veličiny:

#### 1. Impedance nakrátko

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k}, \quad (1.17)$$

$$R_k = Z_k \cdot \cos\varphi_k, X_k = \sqrt{(Z_k^2 - R_k^2)} = Z_k \cdot \sin\varphi_k \quad (1.18)$$

Je nutné poznamenat, že při měření nakrátko proud ohřívá vinutí, čímž se mění jejich odpor  $R_k$ . Abychom se vyhnuli nesprávným výsledkům, musíme měření nakrátko provést tak, aby oteplení vinutí bylo nepatrné. Proto se měření nakrátko obvykle začíná na nejvyšší hodnotě napětí, které se postupně snižuje, a transformátor se připojuje ke zdroji pouze na dobu, nutnou pro jedno čtení údajů měřících přístrojů.[4]

Pro srovnání a přesnější měření lze také  $Z_k$  přepočítat na předpokládanou hodnotu vinutí transformátoru v provozu. Tato teplota se udává jako 75°C.

$$R_c = R + \Delta R, \quad (1.19)$$

kde  $R$  je odpor při střídavém proudu, u kterého je známo, že se skládá ze dvou složek.  $R$  je odpor, který závisí na materiálu vodiče a rozměrech a  $\Delta R$  jsou dodatečné ztráty vířivými proudy způsobené magnetickým polem vodiče.

Tedy při 75°C bude odpor měděného vodiče

$$R_{75} = R_{\theta} \cdot \frac{310}{235 + \theta} \quad (1.20)$$

Dále ztráty vířivými proudy jsou nepřímo úměrné k měrnému odporu, takže

$$\Delta R_{75} = \Delta R_{\vartheta} \cdot \frac{235+\vartheta}{310}. \quad (1.21)$$

Ztráty, které způsobují vířivé proudy vně vodiče, se mění s teplotou, a proto přepočítáme odpor z teploty  $\vartheta^{\circ}\text{C}$  na teplotu  $75^{\circ}\text{C}$ .

$$R_{.75} \approx R_{\vartheta} \zeta \cdot \left(1 + \frac{\Delta R_{k\vartheta}}{R_{k\vartheta} \zeta^2}\right), \quad (1.22)$$

$$\zeta = \frac{310}{235+\vartheta}. \quad (1.23)$$

Poté změříme při teplotě  $\vartheta^{\circ}\text{C}$  stejnosměrným proudem odpor vstupní a výstupního vinutí  $R_{1\vartheta}, R_{2\vartheta}$ . Určíme

$$R_{k\vartheta} = R_{1\vartheta} + p^2 \cdot R_{2\vartheta} \cdot \Delta R \quad (1.24)$$

$$\text{potom } \Delta R_{k\vartheta} = R_{.k\vartheta} - R_{k\vartheta}, \text{ pak} \quad (1.25)$$

$$R_{.k75} \approx R_{k\vartheta} \zeta \cdot \left(1 + \frac{\Delta R_{k\vartheta}}{R_{k\vartheta} \zeta^2}\right). \quad (1.26)$$

Jestliže ztráty ve vinutí nejsou vyšší jak 10% ztrát základních, můžeme jednoduše odpor  $R_k$  přepočítat na  $75^{\circ}\text{C}$ .

Přepočítáváme pouze impedanci nakrátko a  $\cos\varphi_k$ . Reaktance na teplotě nezávisí.

$$Z_{k75} = \sqrt{(R_{k75}^2 + X_k^2)}, \quad (1.27)$$

$$\cos\varphi_k = \frac{R_{k75}}{Z_{k75}}. \quad (1.28)$$

## 2. Ztráty nakrátko

Pro trojfázový transformátor:

$$\Delta P_k = 3 \cdot U_k \cdot I_k \cdot \cos\varphi_k = 3 \cdot R_k \cdot I_k^2 \quad (1.29)$$

Složení těchto ztrát: ztráty ve vinutí, dodatečné ztráty (vířivé proudy) a ztráty v železe, které jsou ale malé, takže je většinou zanedbáváme.

## 3. Napětí nakrátko

$$u_{k\%} = \frac{U_{kn}}{U_{1N}} \cdot 100, \quad (1.30)$$

kde  $U_{kN}$  je napětí, při kterém ve vinutí protékají jmenovité proudy.

### 1.4.3. Chod při zatížení

Pro chod při zatížení je charakteristická změna vstupního proudu a výstupního napětí se změnou zatížení, tj. se změnou výstupního proudu a impedance  $Z'$ . Obvykle se přitom pokládá, že vstupní napětí je dáno a zůstává konstantní.[4]

Pro chod při zatížení transformátoru je dáno několik rovnic:

$$I'_2 \approx -\frac{U_1}{Z_k + Z'} \quad (1.31)$$

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_1 + Z_0} - \frac{I'_2}{C_0} \approx I_0 - I'_2, \text{ kde} \quad (1.32)$$

$$C_1 = 1 + \frac{Z_1}{Z_0} \quad (1.33)$$

$$\text{Nebo } I_1 \approx I_0 + \frac{U_1}{Z_k + Z'} \quad (1.34)$$

$$U'_2 = Z' \cdot I'_2 \approx -\frac{U_1 \cdot Z'}{Z_k + Z'} \quad (1.35)$$

Pro transformátor je charakteristický stav proměnného zatížení při  $U_1 = \text{konst}$  a  $\cos\varphi = \text{konst}$ .

### 1.5. Nesymetrické zatížení transformátorů

Výkonové transformátory v energetické soustavě jsou napájené téměř souměrným napětím. Zatěžovací proudy však mohou být značně nesymetrické. Tato nesymetrie vzniká především silnou jednofázovou zátěží (el. trakce, el. pece, domácnosti). [3]

Případy nesouměrnosti zátěže se řeší buď metodou souměrných složek, tj. rozkladem nesymetrické soustavy proudů a napětí na symetrické složky: přímou (sousednou) složku, nepřímou (zpětnou) složku a netočivou (nulovou), anebo přímou aplikací základních zákonů teoretické elektrotechniky. [3]

My se budeme zabývat metodou souměrných složek, kterou jsem aplikoval v kapitole 3. S indexem (1) bude označena přímá složka, s indexem (2) nepřímá složka a s indexem (0) netočivá.

Poměr napětí a proudů v každé složkové soustavě dává příslušnou impedanci. Přesněji řečeno: jakmile transformátor ve stavu nakrátko napájíme trojfázovou souměrnou soustavou napětí se sledem fází ve směru hodinových ručiček, nazýváme ji přímou, resp. souslednou. Podíl tohoto napětí a příslušného proudu dává tzv. souslednou, resp. přímou impedanci  $Z_{(1)}$ . Jakmile ten stejný transformátor ve stavu nakrátko napájíme trojfázovou souměrnou soustavou napětí se sledem fází proti směru hodinových ručiček, nazýváme ji zpětnou, podíl tohoto napětí a proudu dává tzv. zpětnou impedanci  $Z_{(2)}$ . [3]

Protože transformátor je netočivý stroj, impedance transformátoru nebude záviset na tom, jestli je magnetovaný sled fází ve směru hodinových ručiček nebo naopak. Proto i impedance zpětné a sousledné složky jsou stejné a shodné s impedancí ve stavu nakrátko [3]:

$$Z_{(1)} = Z_{(2)} = Z_k. \quad (1.36)$$

Pokud tento transformátor napájíme tak, že všechny tři fáze jsou magnetované současně stejným napětím a souhlasně ve stejném směru, tj. bez časového posunu jednotlivých fází, jde o „netočivou,“ (jednosměrnou) magnetizaci a podíl takového napájecího napětí a příslušného proudu dává tzv. netočivou impedanci  $Z_{(0)}$ . [3]

Tato netočivá impedance  $Z_{(0)}$  je velmi důležitá při nesouměrných zatíženích transformátoru. Při takových zatíženích se totiž transformátor chová tak, jako kdyby byl současně vystavený sousledné, zpětné i netočivé magnetizaci. Jednotlivé složky proudu se vyvinou právě podle toho, jaké jsou hodnoty impedancí  $Z_{(1)}$ ,  $Z_{(2)}$ ,  $Z_{(0)}$ . [3]

Jednosměrná magnetizace způsobuje v chodu transformátoru určité problémy (dodatečné ztráty, zvýšené oteplení), proto se jí snažíme omezit.[3]

Pokud prochází proud netočivé složky vinutím trojfázového transformátoru s kostrou jádrového typu, magnetují se všechny tři jádra souhlasně a magnetický tok netočivé složky se musí uzavírat mimo hlavní magnetický obvod, tj. po cestách které nejsou přizpůsobené na vedení střídavého magnetického toku (stahovací konstrukce, nádoba). V těchto částech vznikají značné ztráty, které zhoršují účinnost transformátoru. [3]

Dalším důsledkem jednosměrné magnetizace jsou poměrně velké úbytky napětí na impedanci  $Z_{(0)}$  proudem netočivé složky  $I_{(0)}$ . Tento úbytek  $Z_{(0)}I_{(0)}$  deformuje fázorovou hvězdu fázových napětí. Vysouvá nulový bod z původní souměrné polohy a tím způsobuje nepřipustný pokles napětí v jedné fázi a zvýšení v jiné fázi.[3]

Z toho vyplývá, že vyšetřování hodnoty  $Z_{(0)}$  je třeba věnovat pozornost. Hodnota  $Z_{(0)}$  závisí na způsobu zapojení primárního i sekundárního vinutí, konstrukčního uspořádání magnetického obvodu, způsobu spojení vinutí se sítí a zátěží. Proto spolehlivé údaje je třeba získat měřením. [3]

## 2. Měření na transformátoru

### Štítek transformátoru

Tab. 2.1 Výpis několika parametrů štítku transformátoru

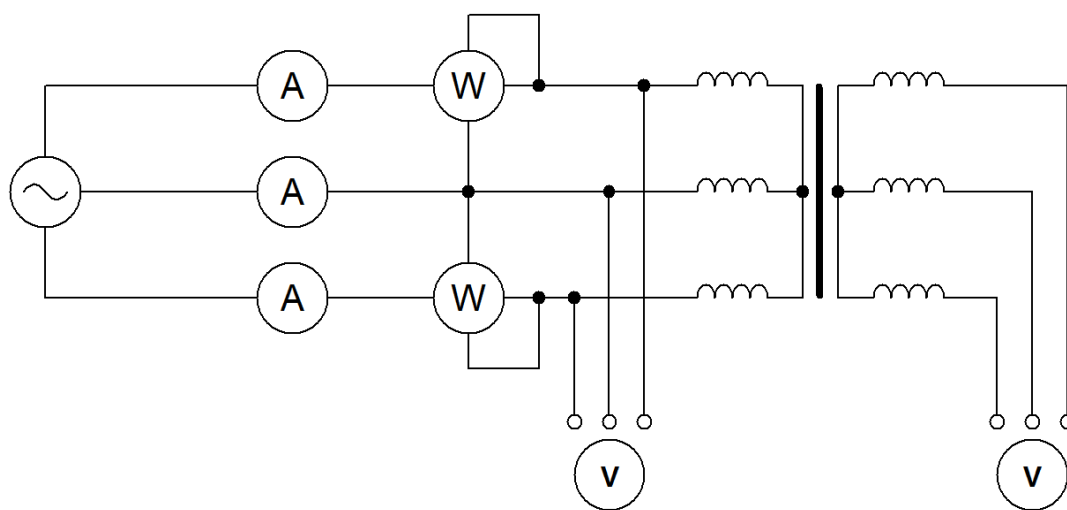
Typ	TV10 Mohelnice
S	10000VA
Prim	3x500V D
Sek	3x380V Y

### 2.1. Měření naprázdno

Transformátor se napájí proměnlivým napětím obvykle ze strany nižšího napětí a měří se napětí, proud a výkon. Výkon je roven ztrátám naprázdno. Vzhledem k nepatrným Joulovým ztrátám ve vinutí malým magnetizačním proudem naprázdno lze zpravidla ztráty naprázdno považovat za shodné se ztrátami v železe.[2]

Měření naprázdno provádíme při napětí vstupního vinutí, až do 1,15 násobku jmenovitého vstupního napětí.

#### Schéma zapojení pro měření naprázdno



Obr. 2.1 Schéma zapojení pro měření naprázdno

Vzorek naměřených hodnot:

Tab. 2.2 Vzorek naměřených hodnot  $U_1, U_2, U_3, U_0, I_1, I_2, I_3, I_0$

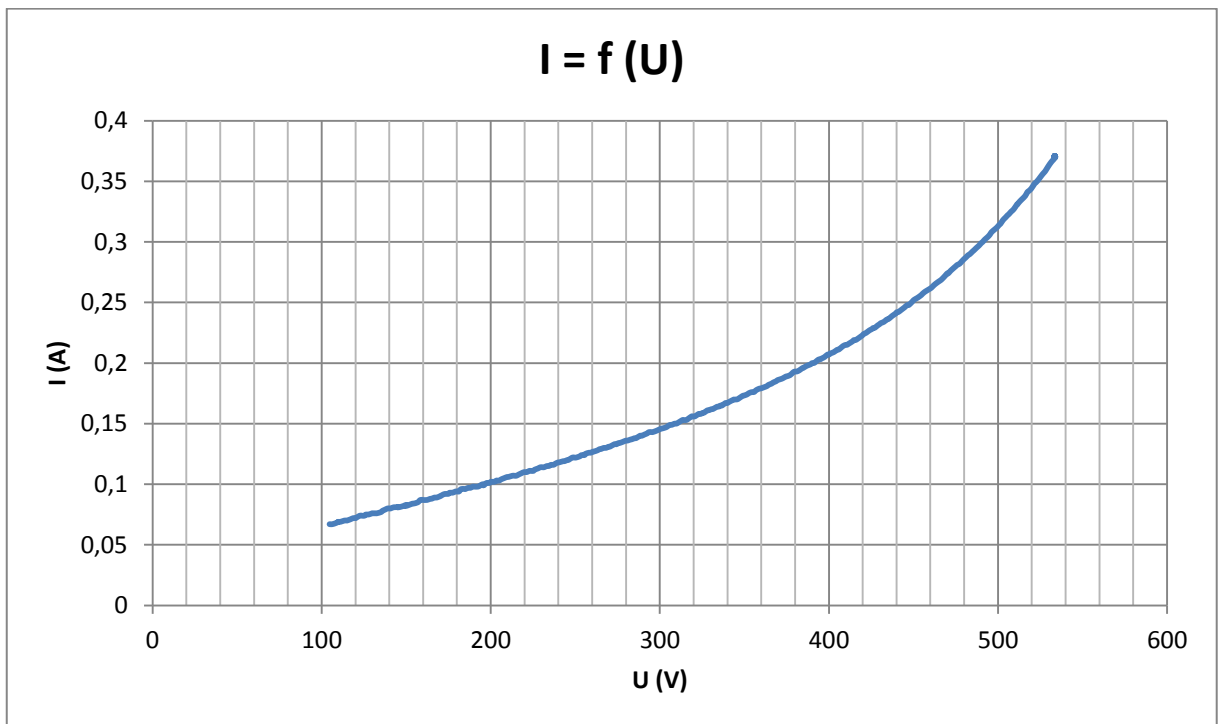
$U_1$ [V]	$U_2$ [V]	$U_3$ [V]	$U_0$ [V]	$I_1$ [A]	$I_2$ [A]	$I_3$ [A]	$I_0$ [A]
506,239	503,260	507,289	505,679	0,395	0,291	0,280	0,322
505,330	501,500	506,198	504,354	0,392	0,289	0,277	0,320
503,897	500,327	504,553	502,952	0,391	0,288	0,276	0,318
502,490	499,176	502,610	501,494	0,387	0,285	0,274	0,315
501,128	497,996	502,541	500,665	0,386	0,284	0,273	0,314
500,533	496,957	501,264	499,435	0,383	0,283	0,271	0,312
499,175	495,117	498,950	497,757	0,381	0,281	0,269	0,310
497,093	494,044	497,499	496,140	0,378	0,278	0,267	0,308
496,377	492,408	496,578	495,182	0,377	0,277	0,266	0,306
494,307	491,663	495,950	493,876	0,374	0,276	0,264	0,304

Tab. 2.3 Vzorek naměřených hodnot  $P_1, P_2, P_3, P_0, \cos\varphi_0$

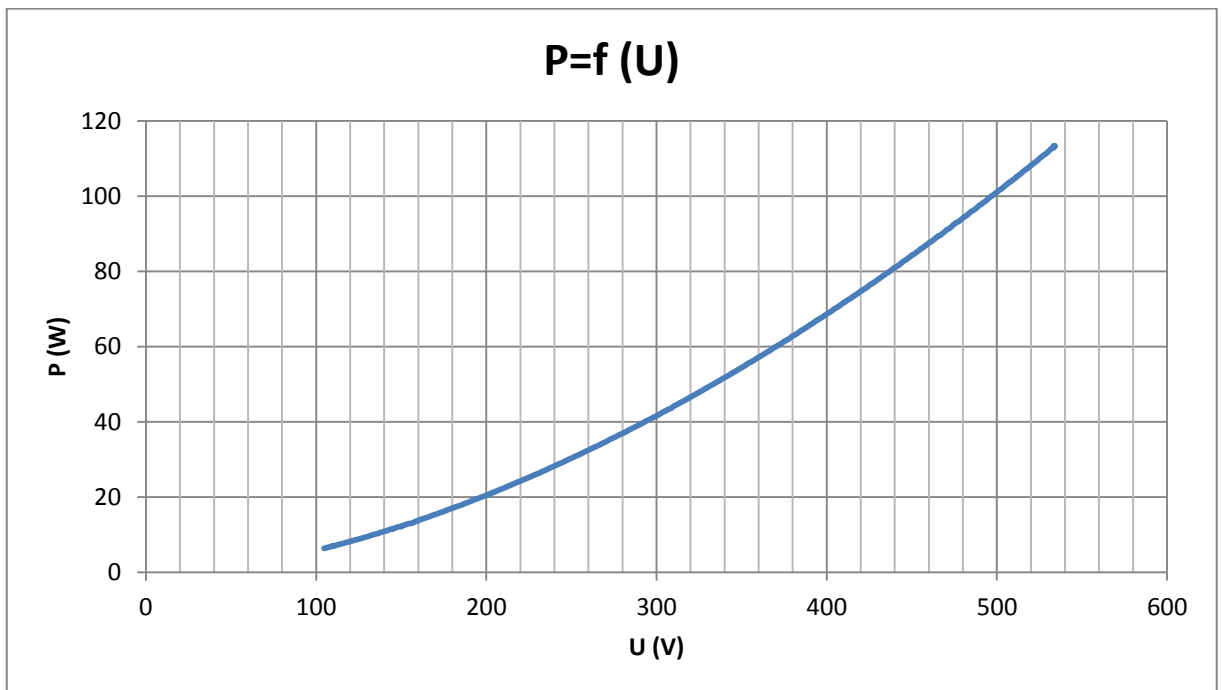
$P_1$ [W]	$P_2$ [W]	$P_3$ [W]	$P_0$ [W]	$\cos\varphi_0$ [-]
-25,415	-143,538	128,284	103,051	0,365
-24,597	-142,281	126,946	102,530	0,367
-24,114	-141,005	126,099	101,979	0,368
-23,582	-139,484	124,856	101,600	0,371
-23,224	-138,663	124,375	101,248	0,372
-22,305	-137,893	123,155	100,835	0,373
-21,912	-136,144	121,985	100,242	0,375
-21,215	-134,582	120,829	99,763	0,377
-20,963	-133,740	120,129	99,400	0,378
-20,303	-132,617	119,292	98,847	0,379

Z naměřených hodnot naprázdno se zpravidla určují závislosti  $I_0=f(U_0), P_0=f(U_0)$  a  $\cos\varphi_0=f(U_0)$ .  
Můžeme tedy sestavit graficky tyto závislosti.

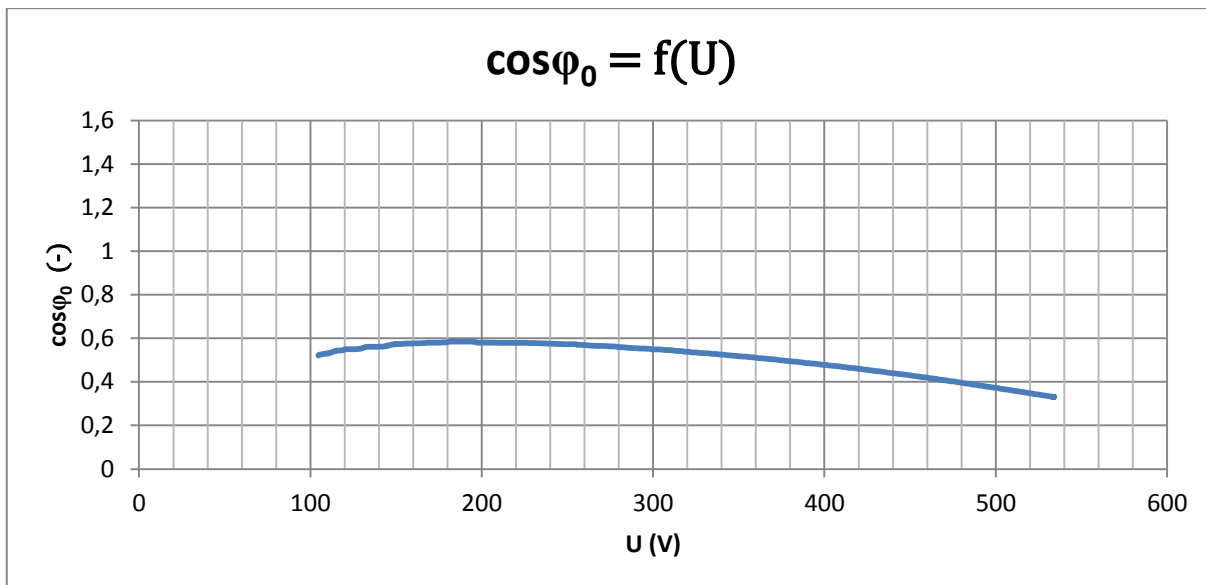
Naměřené grafické závislosti



Obr. 2.2 Grafická závislost  $I_0=f(U_0)$



Obr. 2.3 Grafická závislost  $P_0=f(U_0)$

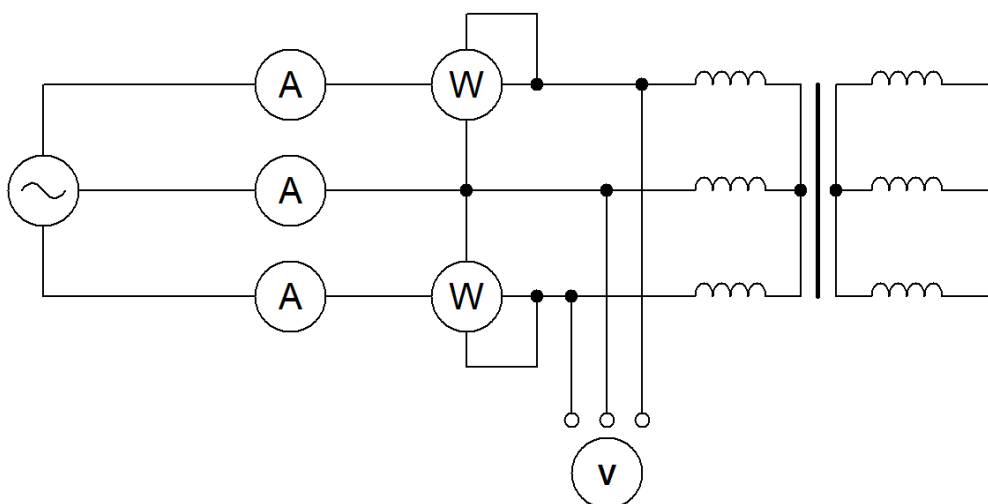


Obr. 2.4 Grafická závislost  $\cos\varphi_0=f(U_0)$

## 2.2. Měření nakrátko:

Jedno z obou vinutí se na svorkách spojí nakrátko a druhé se napájí sníženým napětím tak, aby oběma vinutími protékal jmenovitý proud, nebo alespoň přibližně jmenovitý proud. Měří se napětí, proud a výkon na napájené straně. Jestliže se neměřilo při jmenovitém proudu, přepočítává se napětí v poměru proudu jmenovitého k měřenému, ztráty v poměru druhých mocnin zmíněných proudů. Ztráty  $\Delta P_k$  jsou Joulovými ztrátami v obou vinutích, jelikož ztráty v železe jsou zanedbatelné [2]

Schéma zapojení pro měření nakrátko:



Obr. 2.5 Schéma zapojení pro měření nakrátko



Vzorek naměřených hodnot:

Tab. 2.4 Vzorek naměřených hodnot  $U_1, U_2, U_3, U_k, I_1, I_2, I_3, I_k$

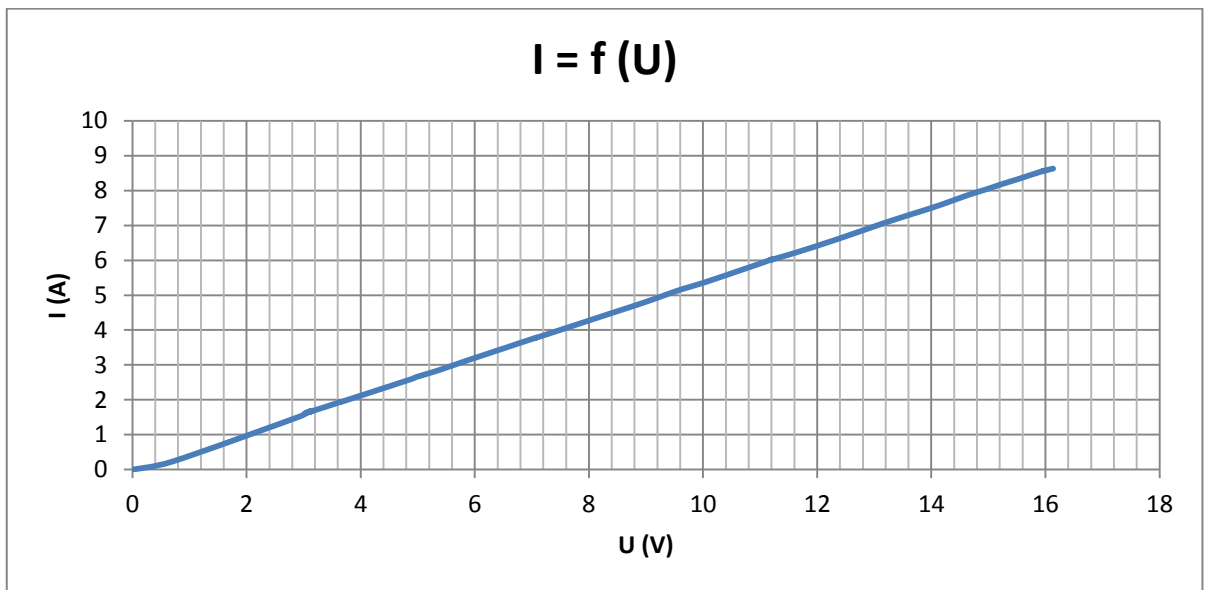
$U_1$ [V]	$U_2$ [V]	$U_3$ [V]	$U_k$ [V]	$u_k$ [%]	$I_1$ [A]	$I_2$ [A]	$I_3$ [A]	$I_k$ [A]
16.722	15.014	16.121	15.954	5,76	8.32	8.96	8.39	8.56
16.728	15.023	16.117	15.957		8.32	8.97	8.39	8.56
16.728	15.019	16.118	15.956		8.32	8.96	8.39	8.56
16.734	15.033	16.119	15.962		8.33	8.97	8.39	8.56
16.738	15.040	16.122	15.966		8.33	8.97	8.39	8.56
16.740	15.041	16.124	15.966		8.33	8.97	8.39	8.56
16.734	15.042	16.128	15.966		8.33	8.97	8.39	8.56
16.725	15.039	16.134	15.966		8.33	8.96	8.4	8.56
16.743	15.036	16.123	15.969		8.33	8.97	8.39	8.57
16.743	15.045	16.123	15.968		8.33	8.97	8.39	8.57

Tab. 2.5 Vzorek naměřených hodnot  $P_1, P_2, P_3, P_k, \cos\varphi_k$

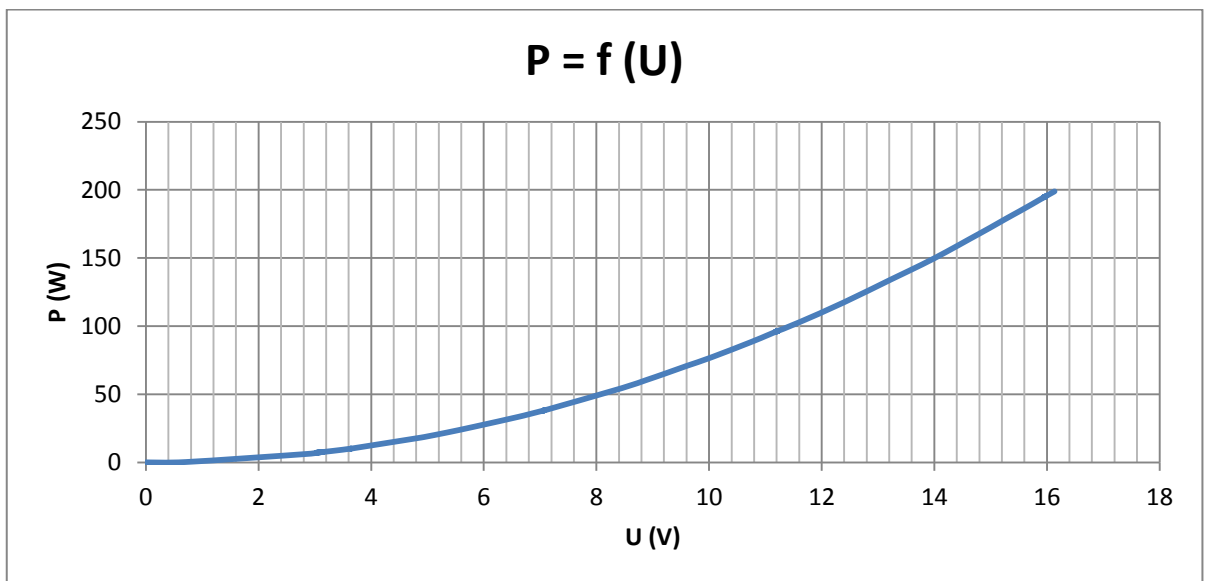
$P_1$ [W]	$P_2$ [W]	$P_3$ [W]	$P_k$ [W]	$\cos\varphi_k$ [-]
59.862	-78.432	134.803	194.761	0.825
60.023	-78.600	134.741	194.817	0.825
59.964	-78.537	134.768	194.815	0.825
60.164	-78.771	134.770	194.934	0.825
60.220	-78.814	134.833	195.030	0.825
60.175	-78.818	134.857	195.053	0.825
60.216	-78.749	134.884	195.026	0.825
60.117	-78.619	135.015	195.046	0.825
60.099	-78.796	134.849	195.097	0.825
60.213	-78.858	134.855	195.091	0.825

Z naměřených hodnot naprázdno se zpravidla určují závislosti  $I_k=f(U_k), P_k=f(U_k)$  a  $\cos\varphi_k=f(U_k)$ .  
Můžeme tedy sestavit graficky tyto závislosti.

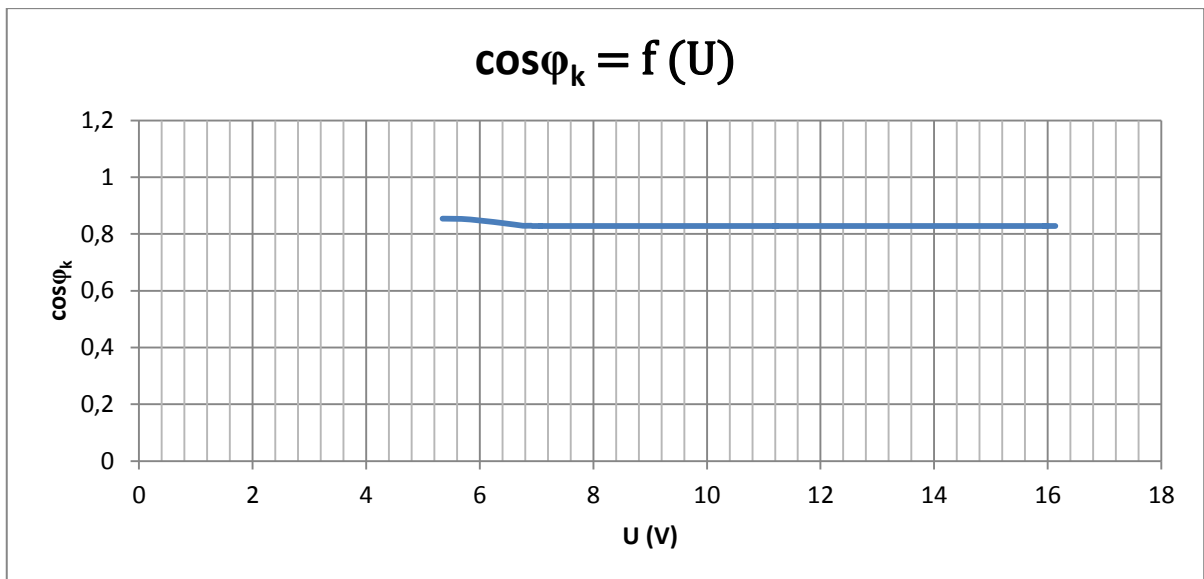
Naměřené grafické závislosti



Obr. 2.6 Grafická závislost  $I_k=f(U_k)$



Obr. 2.7 Grafická závislost  $P_k=f(U_k)$



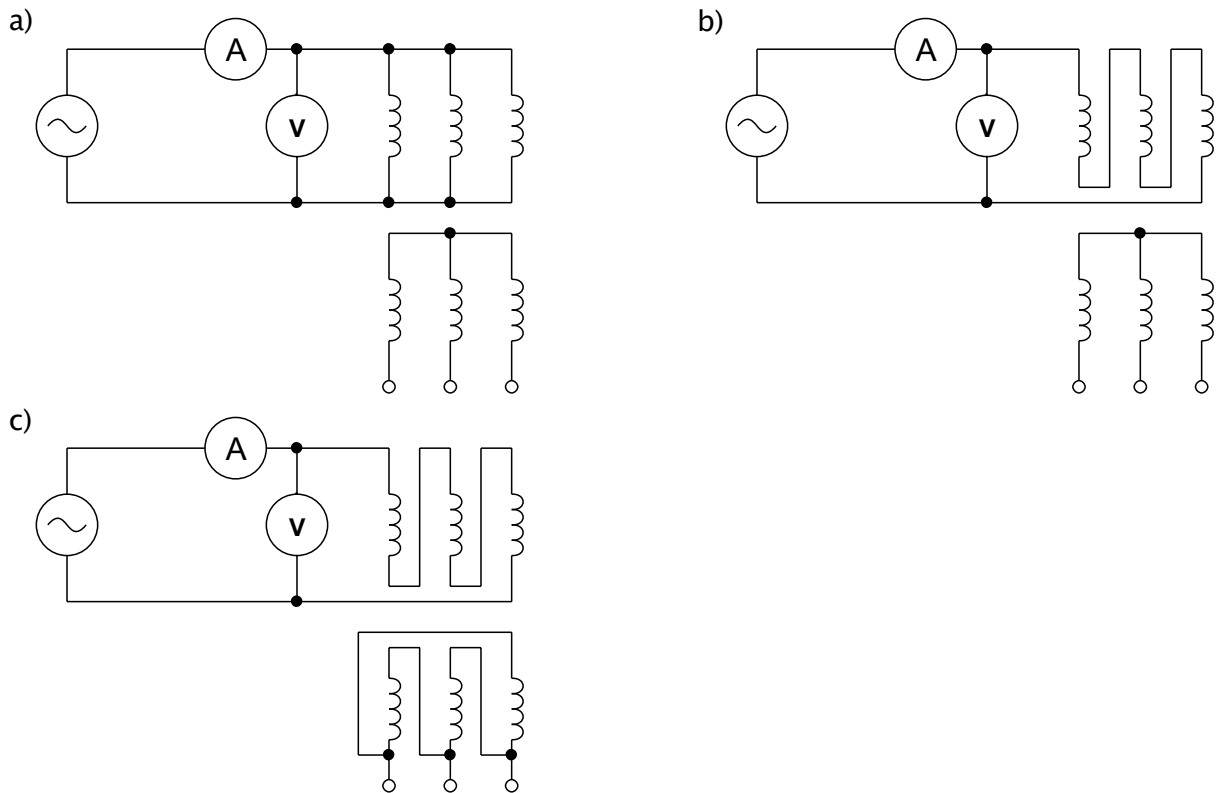
Obr. 2.8 Grafická závislost  $\cos \varphi_k = f(U_k)$

### 2.3. Měření netočivé impedance $Z_{(0)}$

Při měření netočivé složky impedance  $Z_{(0)}$  je třeba zabezpečit, aby všechny tři jádra byly magnetované stejně, ve fázi. Tedy transformátor by měl být napájený ze třech stejných zdrojů proudu. Technicky se to nahrazuje jedním jednofázovým zdrojem, ale vinutí všech tří fází jsou zapojené do série nebo paralelně, abychom zabezpečili souhlasnou jednofázovou magnetizaci všech tří jader.[3]

Výpočet  $Z_{(0)}$  se liší podle toho, jestli jsme vinutí zapojili do série nebo paralelně.[3]

Schéma pro měření netočivé složky  $Z_{(0)}$



Obr. 2.9 Schéma zapojení pro měření  $Z_{(0)}$   
 a) Paralelní zapojení, sekundární vinutí Y  
 b) Sériové zapojení, sekundární vinutí Y  
 c) Sériové zapojení, sekundární vinutí D

V našem případě, jsme měřili  $Z_{(0)}$  pouze v zapojení a) a b), jelikož v další kapitole se zajímáme pouze o zapojení sekundárního vinutí do Y.

Naměřené hodnoty a výpočet netočivé impedance  $Z_{(0)}$ :

a) Pro paralelní zapojení

Tab. 2.6 Naměřené hodnoty proudu a napětí pro paralelní zapojení

I[A]	U[V]
0,48	5,4
0,95	11
3,5	45,5

$$Z_{(0)} = 3 \cdot \frac{U_f}{I_f} = 3 \cdot \frac{U_0}{I_0} \quad (2.1)$$

$$Z_{(0)} = 3 \cdot \frac{45,5}{3,5} = 39\Omega \quad (2.2)$$

b) Pro sériové zapojení

Tab. 2.7 Naměřené hodnoty proudu a napětí pro sériové zapojení

I[A]	U[V]
0,28	5,4
0,56	11
0,41	45,5

$$Z_{(0)} = \frac{U_f}{3 \cdot I_f} = \frac{U_0}{3 \cdot I_0} \quad (2.3)$$

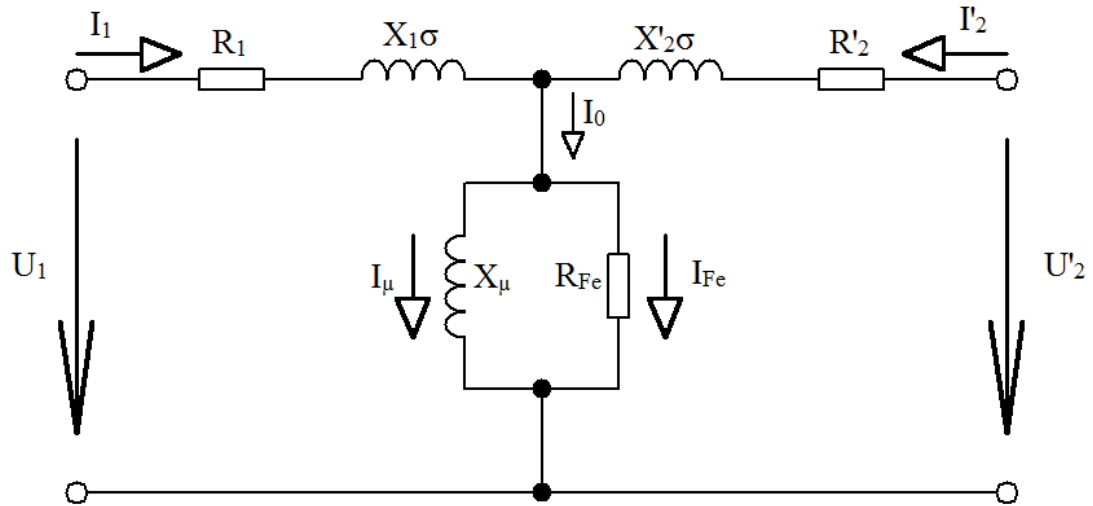
$$Z_{(0)} = \frac{45,5}{3 \cdot 0,41} = 37 \Omega \quad (2.4)$$

Pro obě zapojení jsme změřili přibližně stejnou netočivou impedanci  $Z_{(0)}$ . Rozdíly mohou být způsobeny samozřejmě nepřesnostmi měření. Lze říci, že  $Z_{(0)} \doteq 38 \Omega$ .

#### 2.4. Náhradní schéma transformátoru:

Náhradní schéma nám slouží k jednoduchému zkoumání chodu transformátoru. A to při různých podmínkách zatížení. Vychází z ideálního transformátoru.

##### Úplné náhradní schéma transformátoru

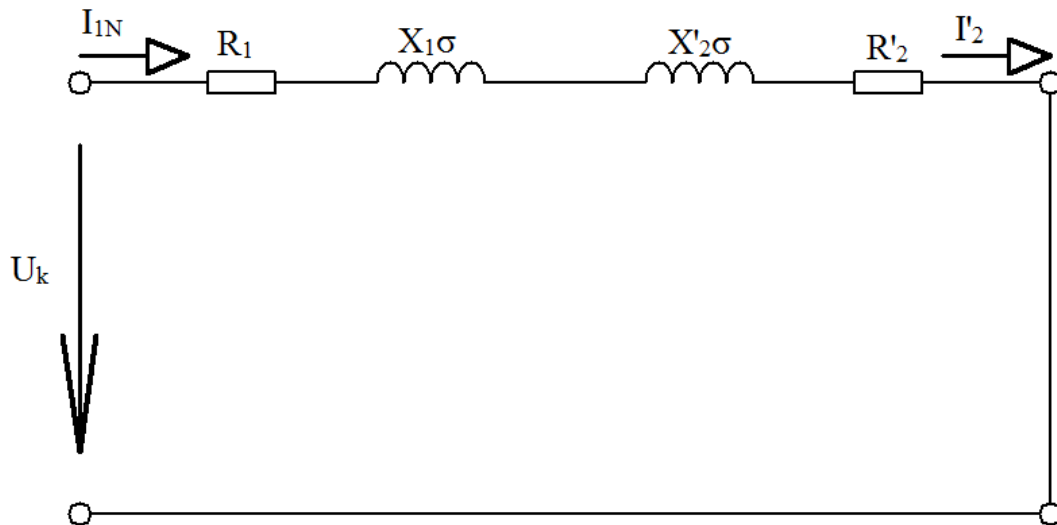


Obr. 2.10 Úplné náhradní schéma transformátoru

Nejprve si vypočítáme prvky  $R_1$ ,  $X_{1\sigma}$ ,  $R'_2$  a  $X'_{2\sigma}$ . Pro výpočet těchto prvků použijeme upravené schéma pro transformátor ve spojení nakrátko. Kdy příčná větev je zanedbána a sekundární svorky jsou spojeny nakrátko.

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 500} = 11,55 A \quad (2.5)$$

Náhradní schéma transformátoru nakrátko



Obr. 2.11 Náhradní schéma transformátoru nakrátko

$$R_K = \frac{\Delta P_k}{3 \cdot I_N^2} = \frac{194,761}{3 \cdot 3,8,56^2} = 0,886 \Omega \quad (2.6)$$

$$\Delta P_k = \sqrt{3} \cdot U_k \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k = \sqrt{3} \cdot 15,954 \cdot 8,56 \cdot 0,825 = 194,761 \text{ W} \quad (2.7)$$

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_k}{2} = 0,443 \Omega \quad (2.8)$$

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{500}{220} = 2,273 \quad (2.9)$$

$$R_2 = \frac{R_1}{p^2} = \frac{0,443}{2,273^2} = 0,086 \Omega \quad (2.10)$$

$$Z_N = \frac{U_N}{\frac{I_{1N}}{\sqrt{3}}} = \frac{500}{\frac{11,55}{\sqrt{3}}} = 75,31 \Omega \quad (2.11)$$

$$Z_K = \frac{u_{k\%} \cdot Z_N}{100} = \frac{5,76 \cdot 75,31}{100} = 4,34 \Omega \quad (2.12)$$

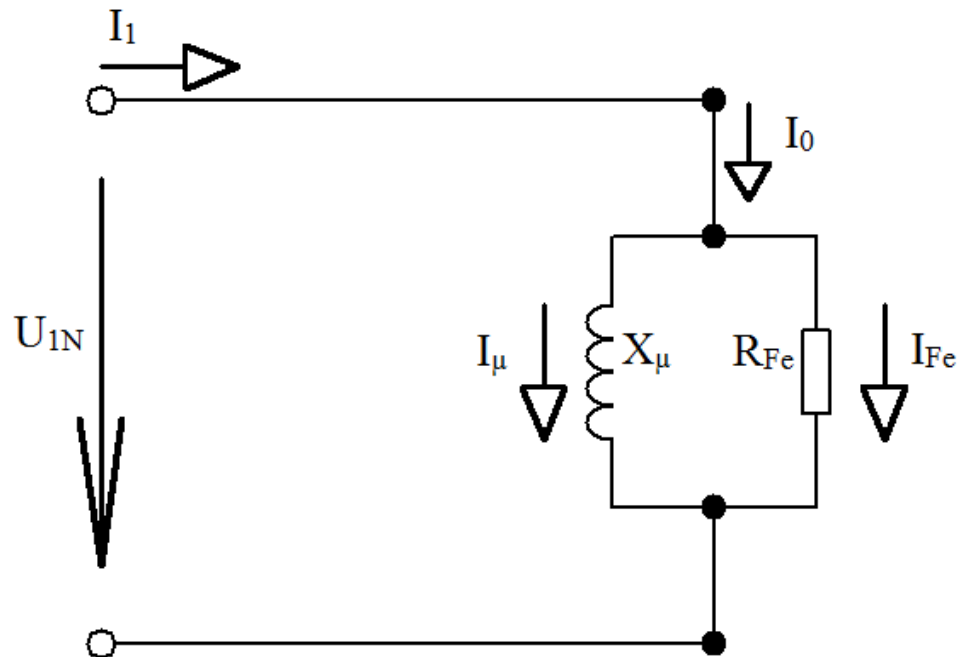
$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2} \rightarrow X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{4,34^2 - 0,886^2} = 4,249 \Omega \quad (2.13)$$

$$\rightarrow X_1 \sigma = 2,123 \Omega$$

$$X_2 \sigma = \frac{X_1 \sigma}{p^2} = \frac{2,123}{2,273^2} = 0,411 \Omega \quad (2.14)$$

Dále, pro výpočet prvků  $R_{Fe}$  a  $X_\mu$  znovu použijeme upravené schéma pro transformátor ve spojení naprázdno. Kdy využíváme pouze příčnou větev.

Náhradní schéma transformátoru naprázdno



Obr. 2.12 Náhradní schéma transformátoru naprázdno

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_0 \cdot I_0} = \frac{101,248}{\sqrt{3} \cdot 500,665 \cdot 0,314} = 0,372 \quad (2.15)$$

$$\rightarrow \sin\varphi_0 = 0,9282$$

$$X_\mu = \frac{U_{1f}}{\sqrt{3} \cdot I_0 \cdot \sin\varphi_0} = \frac{500}{\sqrt{3} \cdot 0,314 \cdot 0,9282} = 99,43\Omega \quad (2.16)$$

$$R_{Fe} = \frac{3 \cdot U_{1f}^2}{\Delta P_0} = \frac{3 \cdot 500^2}{101,248} = 7407,6\Omega \quad (2.17)$$

### 3. Nesymetrické zatížení transformátorů

Při zkoumání chodu transformátorů při nesymetrickém zatížení jsem zvolil nejlepší metodu. A to metodu nesouměrných složek.

Pár základních skutečností metody souměrných složek:

1. Nulová složka proudu vzniká pouze tehdy, jestliže jen jedno z vinutí, vstupní nebo výstupní, má vyvedený nulový bod a jestliže je tento bod zatížen. Nulová složka se rovná 1/3 proudu v nulovém vývodu.[1]
2. Nulová složka proudu jednoho vinutí (např. výstupního, spojeného do hvězdy s uvedenou nulou) může mít svůj protějšek ve druhém (vstupním) vinutí jen tehdy, když toto druhé vinutí je spojeno do hvězdy s vyvedeným nulovým bodem. Výjimkou je spojení do lomené hvězdy, v němž se nulové ampéřzávity kompenzují uvnitř téhož vinutí a nepřenášejí se do jiného vinutí, nezávisle na skupině spojení. [1]
3. Sousedná složka a zpětná složka proudu tvoří normální trojfázové systémy, a proto vystupují vždy současně na vstupní i výstupní straně, nezávisle na způsobu spojení. Z toho tedy plyne, že v případě existence jen sousledných a zpětných složek, jsou vždy fázové proudy vstupní a výstupní strany kompenzovány (rovnost ampéřzávitů, při zanedbání proudu naprázdno) – úplná kompenzace vstupních a výstupních ampéřzávitů na každém jádře. [1]
4. Ježto v transformátorech nejsou točící se části a dále poněvadž se ampéřzávity každé z obou složek (sousedné a zpětné) kompenzují ve fázových vinutích vstupní a výstupní strany, jsou odpory a reaktance transformátoru stejné pro obě složky proudu a stejné jsou i odpory a reaktance nakrátko.[1]

#### 3.1. Chod nakrátko v zapojení Yy

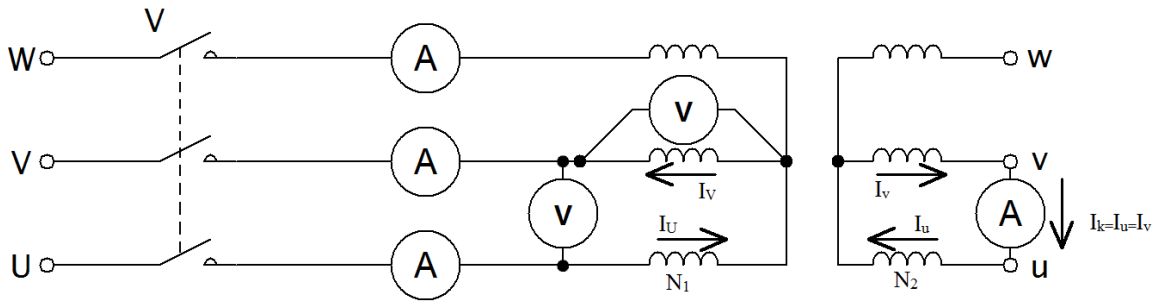
##### 3.1.1. Charakteristické znaky spojení Yy

Je to nejjednodušší skupina spojení. Při stejném výkonu a sdruženém napětí má fázové vinutí hvězdy při porovnání s trojúhelníkem  $\sqrt{3}$ krát méně závitů o  $\sqrt{3}$ krát větším průřezu. Čím je napětí větší a výkon menší, tím jsou výhody vyplývající z použití spojení do hvězdy větší (v porovnání s trojúhelníkem). Plyne to z toho, že pro menší počet závitů většího průřezu je třeba menší místo pro závitovou izolaci. Kromě toho u menších jednotek závisí počet cívek, na které se často vinutí vysokého napětí dělí, na velikosti fázového napětí (napětí vinutí jednoho jádra). U hvězdy je fázové napětí  $\sqrt{3}$ krát menší než u trojúhelníka, a tím i počet cívek a olejových kanálů oddělujících jednotlivé cívky a zvětšující prostor vinutí, je menší. Výsledný součinitel plnění okna (poměr celkového aktivního průřezu vodičů v okně k jeho ploše) je u hvězdy větší. To vede k menším rozměrům magnetického obvodu, a tedy i transformátoru jako celku. U větších jednotek, kde je vinutí složeno z několika paralelních větví (z technických důvodů tepelných nebo pro snížení přídavných ztrát). Ztrácíme ekonomické výhody plynoucí ze zapojení do hvězdy. Skupinu spojení hvězda-hvězda užíváme jak u malých jednotek pro symetrická zatížení (např. napájení malých motorů), tak i u velkých napájecích jednotek. [1]



### 3.1.2. Dvojpólový chod nakrátko $Y_y$

Schéma měření:



Obr. 3.1 Schéma zapojení pro měření dvojpólového chodu nakrátko  $Y_y$

Naměřené hodnoty:

Tab. 3.1 Naměřené hodnoty  $I_U, I_V, I_W, I_K, U_U, U_V, U_W, U_{UV}, U_{UW}, U_{VW}$  pro dvojpólový chod nakrátko  $Y_y$

$I_U$ [A]	$I_V$ [A]	$I_W$ [A]	$I_K$ [A]	$U_U$ [V]	$U_V$ [V]	$U_W$ [V]	$U_{UV}$ [V]	$U_{UW}$ [V]	$U_{VW}$ [V]
11,6	11,6	0	26	48	48	49	85	85	85

Tab. 3.2 Naměřené hodnoty  $U_u, U_v, U_w, U_{uv}, U_{uw}, U_{vw}$  pro dvojpólový chod nakrátko  $Y_y$

$U_u$ [V]	$U_v$ [V]	$U_w$ [V]	$U_{uv}$ [V]	$U_{uw}$ [V]	$U_{vw}$ [V]
21	21	21	0	37	37

Aplikace metody souměrných složek:

$$N_1 \cdot I_U - N_2 \cdot I_u - N_2 \cdot I_v + N_1 \cdot I_V = 0 \quad / \cdot N_2 \quad (3.1)$$

$$\frac{N_1}{N_2} \cdot I_U - \frac{N_2}{N_1} \cdot I_v - \frac{N_2}{N_2} \cdot I_v + \frac{N_1}{N_2} \cdot I_V = 0 \quad (3.2)$$

$$p \cdot I_U - I_u - I_v + p \cdot I_V = 0 \quad (3.3)$$

$$I_K = I_u = I_v \quad (3.4)$$

$$p \cdot I_U - 2I_K + p \cdot I_V = 0 \quad / + 2I_K \quad (3.5)$$

$$p \cdot I_U + p \cdot I_V = 2I_K \quad / : p \quad (3.6)$$

$$I_U + I_V = 2 \frac{I_K}{p} \quad / : 2 \quad (3.7)$$

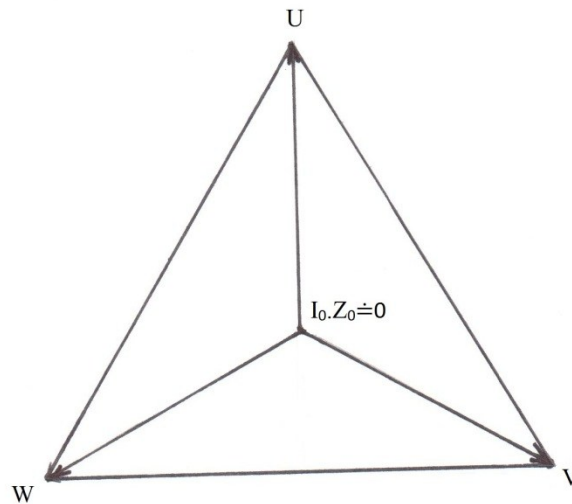
$$\frac{I_U}{2} + \frac{I_V}{2} = \frac{I_K}{p} \quad (3.8)$$

$$I_U = I_V = \frac{I_K}{p} \quad (3.9)$$

Dosazení:

$$I_U = \frac{26}{2,273} = 11,44A \quad (3.10)$$

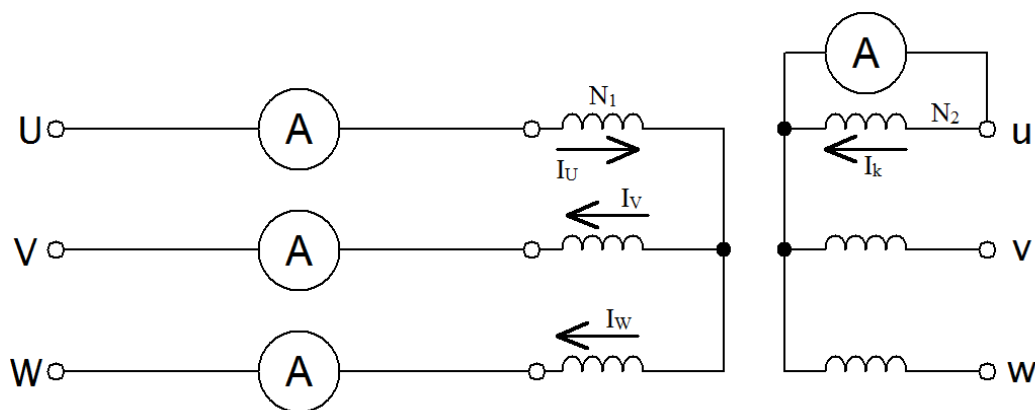
Netočivá složka proudu u tohoto zapojení nevznikne.



Obr. 3.2 Fázorový diagram napětí primárního vinutí

### 3.1.3. Jednopolový chod nakrátko Yy

Schéma měření:



Obr. 3.3 Schéma zapojení pro měření jednopolového chodu nakrátko Yy

Naměřené hodnoty:

Tab. 3.3 Naměřené hodnoty  $I_U, I_V, I_W, I_k, U_U, U_V, U_W, U_{UV}, U_{UW}, U_{VW}$  pro jednopólový chod nakrátko  $Y_y$

$I_U$ [A]	$I_V$ [A]	$I_W$ [A]	$I_k$ [A]	$U_U$ [V]	$U_V$ [V]	$U_W$ [V]	$U_{UV}$ [V]	$U_{UW}$ [V]	$U_{VW}$ [V]
4,55	2,3	2,3	14,8	18,8	158	172	174	176	190

Tab. 3.4 Naměřené hodnoty  $U_u, U_v, U_w, U_{uv}, U_{uw}, U_{vw}$  pro jednopólový chod nakrátko  $Y_y$

$U_u$ [V]	$U_v$ [V]	$U_w$ [V]	$U_{uv}$ [V]	$U_{uw}$ [V]	$U_{vw}$ [V]
0	70	76	70	76	86

Aplikace metody souměrných složek:

$$N_1 \cdot I_U - N_2 \cdot I_k + N_1 \cdot I_V = 0 \quad (3.11)$$

$$N_1 \cdot I_U - N_2 \cdot I_k + N_1 \cdot I_W = 0 \quad (3.12)$$

$$N_1 \cdot I_V - N_1 \cdot I_W = 0 \quad (3.13)$$

$$I_V = I_W \quad (3.14)$$

$$I_U = I_V + I_W = 2 \cdot I_V \Rightarrow I_V = \frac{1}{2} \cdot I_U = I_W \quad (3.15)$$

$$N_1 \cdot I_U - N_2 \cdot I_k + \frac{1}{2} \cdot N_1 \cdot I_U = \frac{3}{2} \cdot N_1 \cdot I_U - N_2 \cdot I_k = 0 \quad (3.16)$$

$$I_U = \frac{2}{3} \cdot \frac{I_k}{p} \quad (3.17)$$

$$I_V = \frac{1}{2} \cdot I_U = \frac{1}{3} \cdot \frac{I_k}{p} \quad (3.18)$$

$$I_W = \frac{1}{3} \cdot \frac{I_k}{p} \quad (3.19)$$

Dosazení:

$$I_U = \frac{2}{3} \cdot \frac{14,8}{2,273} = 4,34A \quad (3.20)$$

$$I_V = \frac{1}{3} \cdot \frac{14,8}{2,273} = 2,17A \quad (3.21)$$

$$I_W = \frac{1}{3} \cdot \frac{14,8}{2,273} = 2,17A \quad (3.22)$$

Netočivá složka proudu:

$$I_{(0)} = \frac{1}{3} \cdot (I_U + I_V + I_W) \quad (3.23)$$

$$\text{Protože } I_V = I_W, \quad (3.24)$$

$$\text{pak } I_{(0)} = \frac{1}{3} \cdot I_U = \frac{1}{3} \cdot I_k \quad (3.25)$$

$$\text{pro náš případ: } I_{(0)} = \frac{1}{3} \cdot \frac{3}{2} \cdot I_U \cdot p = \frac{1}{2} \cdot I_U \cdot p \quad (3.26)$$

$$I_{(0)} = \frac{1}{2} \cdot 4,55 \cdot 2,273 = 5,17A \quad (3.27)$$

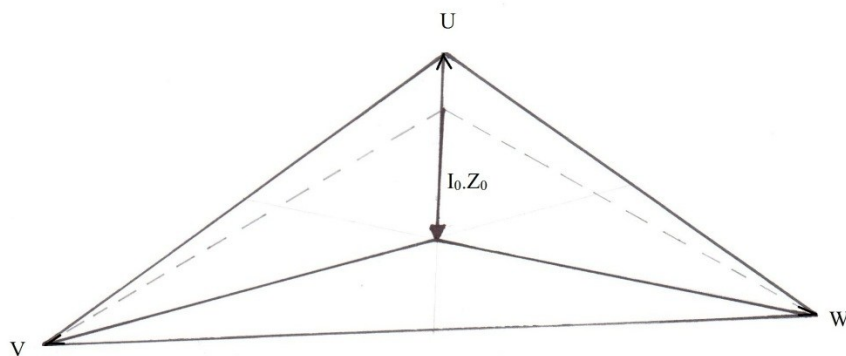
Po vynásobení  $Z_{(0)}$  dostaneme úbytek napětí na sekundární straně

$$Z_{(0)} \cdot I_{(0)} = \frac{1}{2} \cdot Z_{(0)} \cdot I_U \cdot p \quad (3.28)$$

Na primární straně dostaneme netočivou složku po vydělení převodem  $p$

$$I_{(0)} = I_{(0)} \cdot \frac{1}{p} = \frac{1}{2} \cdot I_U \cdot p \cdot \frac{1}{p} \quad (3.29)$$

$$\Delta U_0 = I_{(0)} \cdot Z_{(0)} = \frac{1}{2} \cdot Z_{(0)} \cdot I_U \quad (3.30)$$



Obr. 3.4 Fázorový diagram napětí primárního vinutí s posunutím nulového bodu

Při tomto zapojení vzniká netočivá soustava magnetických napětí, protože jádra jsou magnetovaná stejným magnetickým napětím. [3]

Působením konfázních magnetických toků netočivé složky proudu při jednofázovém zatížení na výstupu trojfázového transformátoru lze odstranit, ale omezit těmito opatřeními:

- 1) Použitím vyrovnávacího (terciálního) vinutí spojeného do trojúhelníka  $Y_{yd}$
- 2) Spojením vstupního vinutí do trojúhelníka  $D_y$
- 3) Spojením výstupu lomené hvězdy  $Y_z$
- 4) Přepojením uzlu primárního vinutí zapojeného do  $Y$  s nulovým vodičem sítě  $Y_Ny$ . [3]

## 3.2. Chod nakrátko v zapojení $D_y$

### 3.2.1. Charakteristické znaky spojení $D_y$

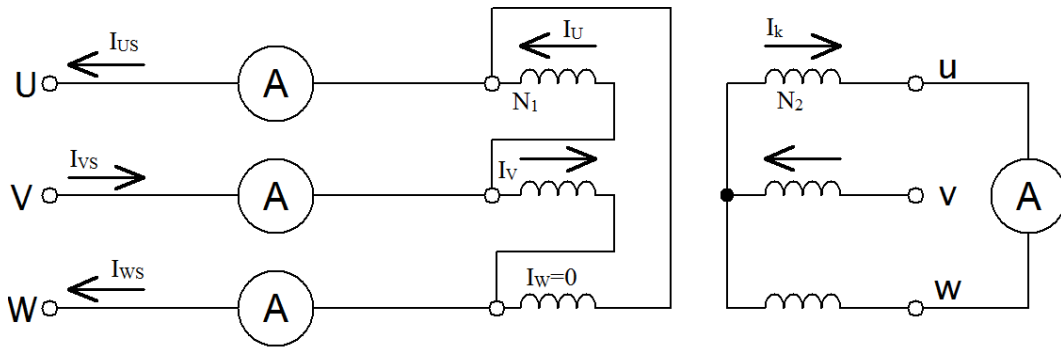
U skupiny spojení  $D_y$  se vždy dovoluje různá možnost nesymetrie (bez vyvedeného nulového bodu na výstupní straně – dvupólové zatížení, s vyvedeným nulovým bodem – jednopólové zatížení); tohoto způsobu se užívá při spojení napájecí sítě s rozvodnou sítí nízkého napětí s vyvedenou nulou (u jednotek s výkony většími než 250kVA) nebo u rozvodných transformátorů větších výkonů, nepřesahuje-li vyšší napětí 35kV. [1]

Určitou výhodou skupině spojení  $D_y$  je možnost chodu v tzv. spojení  $V$  (otevřeného trojúhelníku), u kterého je jedno z fázových vinutí trojúhelníka pro poruchu vyřazeno. Jde pak o

otevřený trojúhelník, jehož vrcholy jsou spojené s trojfázovou sítí. Dvě fáze dostávají napětí vzájemně posunutá o 120°. Magnetické toky v jádrech těchto fází jsou rovněž posunuty o 120°. Tyto toky se uzavírají jádrem, na němž byla poškozená fáze vypojena. Tok zde je tedy v každém okamžiku roven součtu toků obou zbylých jader. Jádrové toky pak tvoří normální trojfázový systém.[1]

### 3.2.2. Dvojpólový chod nakrátko Dy

Schéma měření:



Obr. 3.5 Schéma zapojení pro měření dvojpólového chodu nakrátko Dy

Naměřené hodnoty:

Tab. 3.5 Naměřené hodnoty  $I_U, I_V, I_W, I_k, U_U, U_V, U_W, U_{UV}, U_{UW}, U_{VW}$  pro dvojpólový chod nakrátko Dy

$I_U$ [A]	$I_V$ [A]	$I_W$ [A]	$I_k$ [A]	$U_U$ [V]	$U_V$ [V]	$U_W$ [V]	$U_{UV}$ [V]	$U_{UW}$ [V]	$U_{VW}$ [V]
35	16,4	17	36	67	86	69	67	69	86

Tab. 3.6 Naměřené hodnoty  $U_{uv}, U_v, U_w, U_{uv}, U_{uw}, U_{vw}$  pro dvojpólový chod nakrátko Dy

$U_u$ [V]	$U_v$ [V]	$U_w$ [V]	$U_{uv}$ [V]	$U_{uw}$ [V]	$U_{vw}$ [V]
19,8	19	19	0	0	0

Aplikace metody souměrných složek:

$$-N_1 \cdot I_U + N_2 \cdot I_k + N_2 \cdot I_k - N_1 \cdot I_W = 0 \quad (3.31)$$

$$\text{Pro } I_U = I_W \quad (3.32)$$

$$2 \cdot N_1 \cdot I_U = 2 \cdot N_2 \cdot I_k \quad (3.33)$$

$$I_U = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_k = \frac{I_k}{p} \quad (3.34)$$

Pro síťové proudy platí

$$I_{VS} = I_U \quad (3.35)$$

$$I_{WS} = I_W \Rightarrow I_{WS} = I_{VS} \quad (3.36)$$

$$\text{Pak } I_{US} = I_U + I_W = 2 \cdot I_W \quad (3.37)$$

Z toho plyne:

$$I_{US} = \frac{2.I_k}{p} \quad I_{WS} = \frac{I_k}{p} \quad I_{VS} = \frac{I_k}{p} \quad (3.38)$$

$$I_{US} = \frac{2.36}{2,273} = 31,68A \quad (3.39)$$

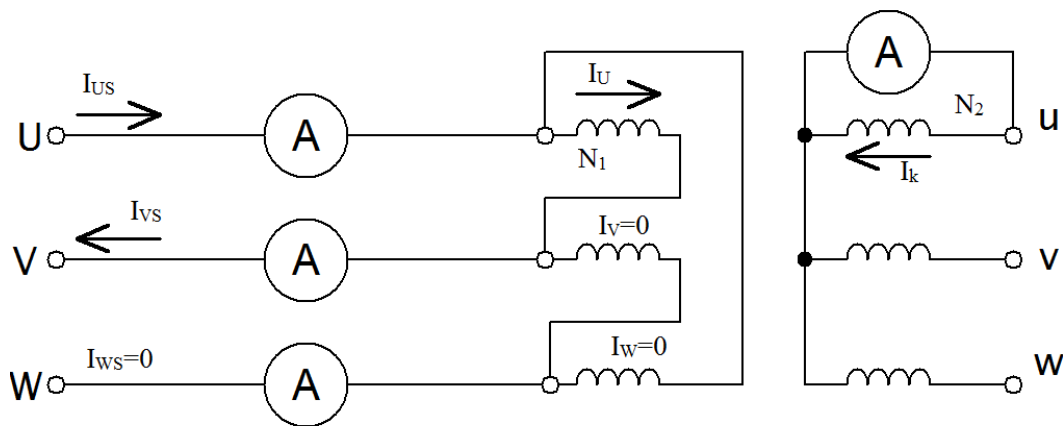
$$I_{WS} = \frac{36}{2,273} = 15,84A \quad (3.40)$$

$$I_{VS} = \frac{36}{2,273} = 15,84A \quad (3.41)$$

V tomto případě netočivá složka proudu nevznikne.

### 3.2.3. Jednopolový chod nakrátko Dy

Schéma měření:



Obr. 3.6 Schéma zapojení pro měření jednopolového chodu nakrátko Dy

Naměřené hodnoty:

Tab. 3.7 Naměřené hodnoty  $I_U, I_V, I_W, I_K, U_U, U_V, U_W, U_{UV}, U_{UW}, U_{VW}$  pro jednopolový chod nakrátko Dy

$I_U$ [A]	$I_V$ [A]	$I_W$ [A]	$I_K$ [A]	$U_U$ [V]	$U_V$ [V]	$U_W$ [V]	$U_{UV}$ [V]	$U_{UW}$ [V]	$U_{VW}$ [V]
7	7	0	14,8	22	28	27,5	22	23	23

Tab. 3.8 Naměřené hodnoty  $U_u, U_v, U_w, U_{uv}, U_{uw}, U_{vw}$  pro jednopolový chod nakrátko Dy

$U_u$ [V]	$U_v$ [V]	$U_w$ [V]	$U_{uv}$ [V]	$U_{uw}$ [V]	$U_{vw}$ [V]
0,7	13	13	13	13,4	23,5

Aplikace metody souměrných složek:

$$N_1 \cdot I_U - N_2 \cdot I_k = 0 \quad (3.42)$$

A protože  $I_V=0$  a  $I_W=0$ , pak proud ve fázi U bude:

$$I_U = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_k = \frac{I_k}{p} \quad (3.43)$$

$$I_U = \frac{14,8}{2,273} = 6,51A \quad (3.44)$$

Na vstupní straně je zatíženo pouze vinutí jedné fáze. Transformátor pracuje jako jednofázové.

## Závěr

Tématem mé bakalářské práce byla analýza nesymetrického zatížení trojfázového transformátoru. V první kapitole práce jsem stručně shrnul princip transformátoru, jeho základní konstrukční uspořádání, provozní stavy a zejména teorii nesymetrického zatížení transformátoru.

V druhé kapitole jsem provedl základní měření naprázdno a nakrátko. Výsledky z těchto měření mi posloužily pro výpočet jednotlivých prvků náhradního schématu a rovněž pro určení energetické bilance transformátoru. V další části měření jsem se zaměřil na určení netočivé impedance  $Z_{(0)}$ , jejíž úbytek napětí deformuje napěťovou hvězdu a vysouvá nulový bod ze své souměrné polohy. V mém případě byla hodnota netočivé impedance  $Z_{(0)}$  měřena v paralelním a sériovém zapojení, kde sekundární vinutí bylo zapojeno do Y. Vypočtená hodnota netočivé impedance  $Z_{(0)}$  byla  $38\Omega$ .

Hlavním cílem této práce, bylo ale měření nesouměrného zatížení na transformátoru, které probíhalo v zapojení Yy a Dy. Celé toto měření je v kapitole 3. Celkem jsem provedl v této kapitole čtyři měření a to: Dvojpólový chod nakrátko v zapojení Yy, jednopólový chod nakrátko v zapojení Yy, dvojpólový chod nakrátko v zapojení Dy a jednopólový chod nakrátko v zapojení Dy. V každém z těchto měření jsem měřil sdružené a fázové hodnoty napětí a proudy v jednotlivých fázích vstupního vinutí. A samozřejmě velikost proudu tekoucího ve zkratovaném obvodu. Tyto proudy jsem jak měřil, tak počítal pomocí vztahů 3.1-3.44, přičemž jsem si také ověřil správnost měření. Naměřené hodnoty ve všech případech zapojení, můžeme vidět v tabulkách 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8. Dle předpokladu, se naměřené hodnoty trochu liší od hodnot vypočtených. S největší pravděpodobností tuto odchylku způsobuje nepřesnost měření. U jednopólového chodu nakrátko Yy vzniká netočivá soustava magnetických napětí. Dojde k posunutí nulového bodu, které je znázorněno graficky (obr. 3.4). Dle vztahu 3.25 můžeme vidět, že netočivá složka proudu má velikost třetiny zatěžovacího proudu, takže pro kompenzaci stačí terciální vinutí dimenzovat na třetinu výkonu transformátoru. U zapojení dvojpólového chodu nakrátko Dy a Yy nevzniká tato netočivá soustava. Poslední je jednopólový chod nakrátko v zapojení Dy, kde transformátor se chová jako jednofázový. Zatíženo je tedy pouze jedno vinutí, v našem případě U.



## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] JEZIERSKI, Eugeniusz. *Transformátory: teoretické základy*. Praha: Academia, 1973, 650 s., obr. příl.
- [2] BAŠTA, Jan, Imrich MAYER a Jaroslav CHLÁDEK. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1968, 582 s. Řada elektrotechnické literatury.
- [3] Hrabovcová, V., Rafajdus, P., Franko, M., Hudák, P.: : *Meranie a modelovanie elektrických strojov*, druhé vydanie, EDIS ŽU v Žilině, Žilina, second edition, 2009, ACB, str.: 335, in slovak language.
- [4] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Překlad Břetislav Benda. Praha: Academia, 1980, 385, [1] s.
- [5] RUSNOK, Stanislav a Pavel Sobota. 2013. *Cvičení z elektrických strojů*. 1. Ostrava: VŠB-TUO. ISBN 978-80-248-3288-3
- [6] ČERMÁK, Tomáš a Svetozár KEPPERT. *Elektrické stroje: určeno pro posl. FSE [fakulta strojní a elektrotechnická] 3. a 4. roč.* 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1978, 142 s.
- [7] D@NdY & Hettrick. *SIZ Elektronická učebnica zo silnoprúdových zariadení* [online]. Poslední revize 26.11.2014. Dostupné z: <[http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske\\_FS/prednasky/sylab\\_TRANS1\\_bc%20FS.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_TRANS1_bc%20FS.pdf)>
- [8] *Katedra elektrotechniky* [online]. Dostupné z: <<http://213.81.187.201/soc-uceb-siz2007/Elektronicka%20ucebnica%20SIZ/HTML/Trojfazove%20transformatory/Trojfazove%20transformatory.htm>>