

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Třífázový transformátor s jednofázovým sekundárním
vinutím**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel KALINA**
Osobní číslo: **E11B0032P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Třířázový transformátor s jednofázovým sekundárním vinutím**
Zadávací 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. Popište činnost a konstrukční uspořádání transformátoru.
2. Uveďte zvláštnosti chodu 3f transformátoru s 1f sekundárním vinutím.
3. Proveďte měření transformátoru v daném zapojení.
4. Vyhodnočte výsledky měření.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

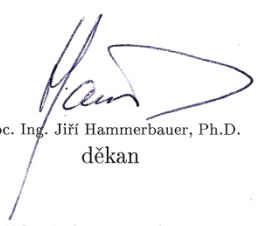
Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jan Šobra


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 Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na třífázový transformátor s jednofázovým sekundárním vinutím. V práci je proveden teoretický rozbor proudů a napětí pro dvě vytipovaná zapojení sekundárního vinutí. Pro měření bylo použito Aronovo zapojení. Naměřené hodnoty jsme zpracovali a provedli jsme porovnání s teoretickými předpoklady. Měřením jsme ověřili, že data z naměřených hodnot odpovídají teoretickým předpokladům. Na základě zjištěných údajů je možné říci, jaké zapojení sekundárního vinutí lze použít pro jaké nesymetrické zatížení.

Klíčová slova

3f transformátor, 1f sekundární vinutí, zatěžovací charakteristika, nesymetrické zatížení, zatěžovací proud, úbytek napětí

Abstract

The bachelor thesis is focused on the three-phase transformer with 1-phase secondary winding. The theoretical analysis of currents and voltages for two chosen secondary winding connections is presented in the thesis. Aron configuration has been used for measuring. The measured values are processed and the evaluation of the theoretical presumptions is performed. The measurement confirmed the theoretical presumptions. Based on the data, it is possible to decide which connection of secondary winding can be used for specific unbalanced load.

Key words

3-phase transformer, 1-phase secondary windings, load characteristics, unbalanced load, loading current, voltage drop

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 4.6.2014

Pavel Kalina

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Šobrovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK V KAPITOLE 1	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK V KAPITOLE 2	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK V KAPITOLE 3	9
ÚVOD	11
1 ČINNOST A KONSTRUKCE TRANSFORMÁTORU	12
1.1 PRINCIP ČINNOSTI TRANSFORMÁTORU	12
1.1.1 <i>Indukované napětí a jeho velikost</i>	13
1.2 KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ TRANSFORMÁTORU	15
1.2.1 <i>Konstrukce magnetického obvodu</i>	16
1.2.2 <i>Konstrukce vinutí</i>	17
1.2.3 <i>Konstrukce olejové nádoby</i>	20
1.3 ROZDĚLENÍ TRANSFORMÁTORŮ PODLE ZPŮSOBU CHLAZENÍ	21
1.3.1 <i>Typ chlazení ONAN</i>	22
1.3.2 <i>Typ chlazení ONAF</i>	22
2 ZVLÁŠTNOSTI CHODU 3F TRANSFORMÁTORU S 1F SEKUNDÁRNÍM VINUTÍM	24
2.1 NESOUMĚRNÉ ZATÍŽENÍ TROJFÁZOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ	24
2.1.1 <i>Dvoupólové nesymetrické zatížení v zapojení typu 1</i>	25
2.1.2 <i>Dvoupólové nesymetrické zatížení v zapojení typu 2</i>	28
3 MĚŘENÍ TRANSFORMÁTORU	30
3.1 MĚŘENÍ V ZAPOJENÍ TYPU 1	30
3.2 MĚŘENÍ V ZAPOJENÍ TYPU 2	33
SEZNAM MĚŘÍCÍCH PŘÍSTROJŮ	36
4 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ	37
SEZNAM LITERATURY	39
SEZNAM OBRÁZKŮ	40
SEZNAM TABULEK	40

Seznam symbolů a zkratk

Seznam symbolů a zkratk v kapitole 1

f	kmitočet sítě	[Hz]
i_1	okamžitá hodnota vstupního proudu	[A]
i_2	okamžitá hodnota výstupního proudu	[A]
N_1	počet závitů primárního vinutí	[-]
N_2	počet závitů sekundárního vinutí	[-]
t	čas	[s]
U_1	efektivní hodnota vstupního napětí	[V]
u_1	okamžitá hodnota vstupního napětí	[V]
U_2	efektivní hodnota výstupního napětí	[V]
u_{i1}	indukované napětí všech závitů vstupní cívky	[V]
U_{i1}	efektivní hodnota indukovaného napětí vstupního vinutí	[V]
U_{i2}	efektivní hodnota indukovaného napětí výstupního vinutí	[V]
u_{i2}	indukované napětí všech závitů výstupní cívky	[V]
U_{iN}	efektivní hodnota indukovaného napětí	[V]
u_{iN}	indukované napětí jednoho závitu vstupní cívky	[V]
$U_{iN \max}$	maximální hodnota indukovaného napětí	[V]
Z	zatěžovací impedance	[Ω]
Φ	magnetický tok	[Wb]
Φ_μ	rozptylový magnetický tok	[Wb]
Φ_h	hlavní magnetický tok	[Wb]
Φ_{\max}	maximální magnetický tok	[Wb]
ω	úhlová rychlost	[rad/s]

Seznam symbolů a zkratk v kapitole 2

I_μ	magnetizační proud	[A]
I_A	vstupní proud protékající vinutím A	[A]
I_a	výstupní proud protékající vinutím a	[A]
I_B	vstupní proud protékající vinutím B	[A]
I_b	výstupní proud protékající vinutím b	[A]
I_c	výstupní proud protékající vinutím c	[A]
I_C	vstupní proud protékající vinutím C	[A]
I_d	proud protékající nulovým vodičem	[A]
I_z	proud protékající zátěží Z	[A]
U_2	sdílené napětí mezi fázemi a, c	[V]
U_a	výstupní napětí na vinutí a	[V]
U_{AB}	vstupní síťové napětí mezi fázemi A a B	[V]
U_b	výstupní napětí na vinutí b	[V]
U_{BC}	vstupní síťové napětí mezi fázemi B a C	[V]
U_c	výstupní napětí na vinutí c	[V]
U_{CA}	vstupní síťové napětí mezi fázemi C a A	[V]

Seznam symbolů a zkratk v kapitole 3

ΔU	úbytek napětí (dáno rozdílem jmenovitého a naměřeného)	[V]
Δu	úbytek napětí	[%]
I_{Avyp}	vypočtený vstupní proud protékající vinutím A	[A]
I_{Cvyp}	vypočtený vstupní proud protékající vinutím C	[A]

I_N	jmenovitý proud transformátoru	[A]
k	jmenovitý převod transformátoru	[-]
P_A	činné ztráty ve vstupním vinutí A	[W]
P_C	činné ztráty ve vstupním vinutí C	[W]
R	rezistor použit jako zátěž	[Ω]
S	jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru	[VA]
U_0	napětí naprázdno	[V]
U_f	jmenovité fázové napětí transformátoru	[V]
U_s	jmenovité sdružené napětí transformátoru	[V]
U_z	napětí na zátěži	[V]

Úvod

Předkládaná práce je zejména zaměřena na třífázový transformátor s jednofázovým sekundárním vinutím. Práce je rozdělena do čtyř částí.

První část se zabývá obecnou činností a konstrukčním uspořádáním transformátoru. Tato část pojednává o obecném principu, jak transformátor pracuje a o složení transformátoru, což je magnetický obvod, vinutí transformátoru, typy chlazení, olejové nádoby atd.

Druhá část práce uvádí teorii zvláštnosti chodu 3f transformátoru s 1f sekundárním vinutím. Obecně je zpracována zvláštnost transformátoru s vyvedeným nulovým uzlem a transformátoru s nevyvedeným nulovým uzlem. Dále je zaměřeno na zvláštnosti chodu při nesymetrickém zatížení ve dvou různých zapojení. Jedná se o obecnou úvahu, kde jsme s pomocí rovnic z teoretické elektrotechniky vyjádřili, jak se transformátor chová v daném zapojení při nesymetrickém zatížení.

Třetí část popisuje postup měření transformátoru v daných dvou různých zapojení. Toto měření jsme provedli známým Aronovo zapojením. Tímto měřením jsme dostali hodnoty pro dvě různá zapojení, ze kterých jsme po dosazení do rovnic z kapitoly 2 dopočetli výsledné hodnoty. Pro obě zapojení jsme z naměřených hodnot na výstupní (sekundární) straně vynesli závislost $U_z = f(I_z)$.

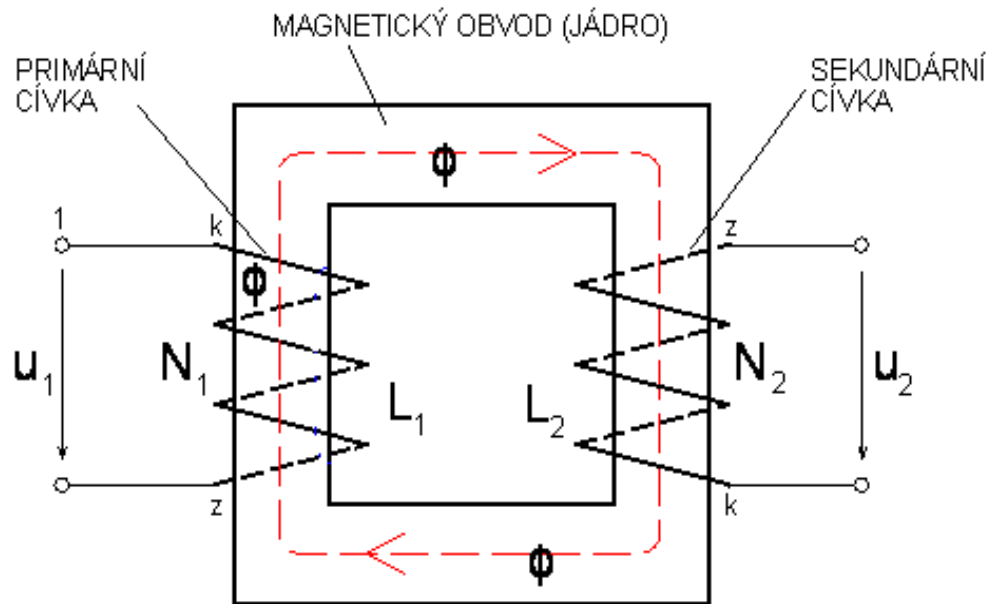
Ve čtvrté části jsme vyhodnotili výsledky měření tím, že jsme porovnali vypočtené výsledné hodnoty s naměřenými hodnotami dle uvedené teorie, porovnali jsme daná zapojení mezi sebou a tím jsme získali potvrzení, jaké zapojení transformátoru je vhodnější použít při větší nesymetrické zátěži.

Teoretická část, tj. činnost a konstrukční uspořádání transformátoru, ale také teoretický rozbor zvláštnosti chodu 3f transformátoru s 3f sekundárním vinutím, jsou zpracovávány převážně z odborné literatury o elektrických strojích a stavbě elektrických strojů. Zatímco teorie dvou uvedených typů zapojení chodu 3f transformátoru s 1f sekundárním vinutím, měření a vyhodnocení výsledků jsou zpracovávány dle vlastních slov.

1 Činnost a konstrukce transformátoru

1.1 Princip činnosti transformátoru

Transformátor je elektrický stroj, který se používá ke změně střídavého napětí a proudu při stálém kmitočtu. Pracuje na principu elektromagnetické indukce, ale bez točivého pohybu.



Obr. 1: Princip činnosti transformátoru, schematické znázornění toků (15)

Jednofázový transformátor se skládá z magnetického obvodu, který je složen z transformátorových plechů (legovaných křemíkem) tloušťky 0,5 nebo častěji 0,35 mm, z vinutí a popřípadě svorkovnice. Aby magnetizační proud potřebný k vybuzení magnetického toku byl co nejmenší, je magnetický obvod uzavřen, tedy bez vzduchových mezer. Na železném jádře jsou navinuty dvě cívky, vstupní (primární) a výstupní (sekundární). Vstupní cívka je připojena na primární napětí U_1 , které se má transformovat pomocí magnetického obvodu a sekundárního vinutí na napětí U_2 .

„Magnetický obvod slouží jako vodič pro magnetický tok. Proud protékající příslušnými vinutími vytvoří tok Φ , který se rozděluje na tok hlavní Φ_h , jeho prostřednictvím dochází k transformaci, je tedy činným tokem, který zabírá s oběma vinutími a na tok rozptylový Φ_μ , který zabírá pouze s vinutím, které jej vybudilo. Na vlastní činnosti

transformátoru se nepodílí, nemá záběr s druhým vinutím.“ (1)

Na svorky vstupní cívky připojíme střídavé napětí s okamžitou hodnotou u_1 . Napětím u_1 se začne uzavírat vinutím proud i_1 souhlasného smyslu. Primární proud i_1 procházející závitů N_1 vybudí v magnetickém obvodu tok Φ , jehož okamžitý smysl lze určit pravidlem pravé ruky. Tento magnetický tok je střídavý o kmitočtu sítě f . Časovou změnou toku se v jednom závitě vstupní cívky indukují napětí u_{iN} a ve všech jejích závitěch napětí u_{i1} , jehož velikost je dána vztahem

$$u_{i1} = u_{iN} * N_1 \quad 1-1$$

Jestliže zanedbáme rozptyl, je stejně veliký magnetizační tok Φ spřažen se závitů výstupní cívky. Tento magnetický tok indukují v jednom závitě výstupní cívky stejně veliké a stejně orientované napětí u_{iN} . Indukované napětí v celé cívkce s počtem závitů N_2 je dáno vztahem

$$u_{i2} = u_{iN} * N_2 \quad 1-2$$

Jestliže je na svorky sekundárního vinutí připojena zatěžovací impedance Z , bude jí procházet proud

$$i_2 = \frac{u_{i2}}{Z} \quad 1-3$$

1.1.1 Indukované napětí a jeho velikost

Napětí indukované v jednom závitě časovou změnou magnetického toku je dáno základním vztahem

$$u_{iN} = \frac{d\Phi}{dt} \quad 1-4$$

Budeme předpokládat, že průběh magnetického toku je sinusový a jeho okamžitá hodnota je

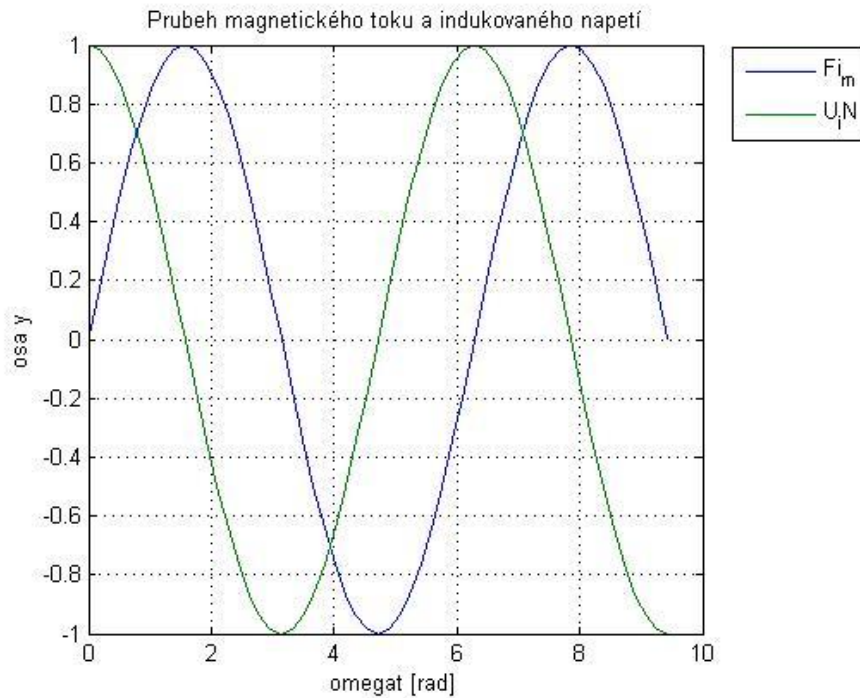
$$\Phi = \Phi_{max} * \sin \omega t \quad 1-5$$

Po dosazení do rovnice (1-4) dostaneme vztah

$$u_{iN} = \omega \Phi_{max} * \cos \omega t \quad 1-6$$

Průběh magnetického toku a jím indukovaného napětí je nakreslen na Obr. 2. Z obrázku je patrné, že indukované napětí předbíhá magnetický tok o 90° . Maximální hodnota indukovaného napětí v jednom závitě je pro $\cos \omega t = 1$, tedy pro $\omega t = 0; 2\pi$

$$U_{iN \max} = \omega \Phi_{\max} = 2\pi f \Phi_{\max} \quad 1-7$$



Obr. 2: Průběh magnetického toku a indukovaného napětí

Efektivní hodnota indukovaného napětí

$$U_{iN} = \frac{1}{\sqrt{2}} * U_{iN \max} = \frac{2}{\sqrt{2}} \pi f \Phi_{\max} = \pi \sqrt{2} f \Phi_{\max} \quad 1-8$$

$$U_{iN} = 4,44 f \Phi \quad 1-9$$

Efektivní hodnoty indukovaného napětí v jednotlivých vinutích jsou dány vztahy

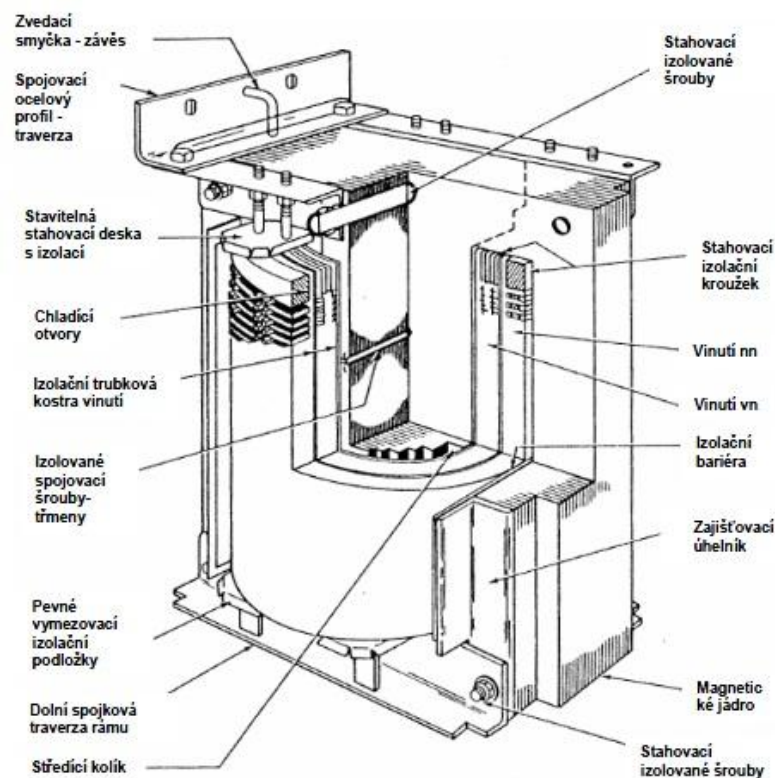
$$U_{i1} = U_{iN} * N_1 = 4,44 f \Phi N_1 \quad 1-10$$

$$U_{i2} = U_{iN} * N_2 = 4,44 f \Phi N_2 \quad 1-11$$

1.2 Konstrukční provedení transformátoru

„Magnetické obvody transformátorů rozlišujeme na dva druhy: jádrový a plášťový. V jednofázovém jádrovém transformátoru jsou vinutí umístěna na dvou jádrech a zapojují se do série, nebo paralelně. Transformátory plášťové konstrukce mají rozvětvený magnetický obvod, který částečně zakrývá vinutí.“ (2) Každý transformátor zásadně obsahuje magnetický obvod složený z transformátorových plechů a minimálně dvě vinutí – primární a sekundární. V každém transformátoru jsou také jisté konstrukční prvky, jako je stahovací konstrukce magnetického obvodu, nosné části vinutí, nádoba transformátoru pro chladicí olej, chladiče, průchodky atd. (1)

Na Obr. 3 je znázorněna konstrukce jednofázového plášťového transformátoru. Rozvětvený magnetický obvod složený z orientovaných plechů s odstupňovaným jádrem je stažen izolovanými spojovacími šrouby a izolovanými stahovacími šrouby. Na odstupňovaném jádře jsou navinuty cívky (vn) a (nn). Mezery mezi odstupňovaným jádrem a vinutím slouží k chlazení. Jednotlivá vinutí jsou izolována od magnetického obvodu i mezi sebou papírovou izolací.



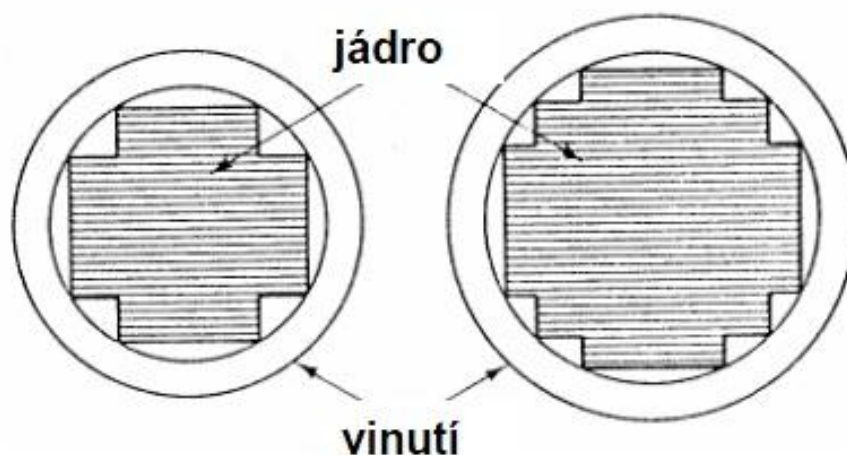
Obr. 3: Konstrukce jednofázového plášťového transformátoru (6)

1.2.1 Konstrukce magnetického obvodu

Hlavním úkolem magnetického obvodu je usměrnit magnetický tok tak, aby jeho maximální část byla tokem, který se podílí na transformaci, tedy tokem hlavním Φ_h . (3) Magnetický obvod je složen ze speciálních transformátorových plechů o tloušťce 0,35 mm až 0,5 mm s obsahem křemíku. Plechy jsou nejčastěji navzájem izolovány proti vířivým proudům lakem nebo fosfátováním. (4)

Magnetické obvody transformátorů se nejčastěji skládají z orientovaných plechů (válcovaných za studena) se sycením $B_{\max} = 1,7 \text{ T}$ a měrnými ztrátami do $1,3 \text{ W/kg}$, u kterých jsou ve směru válcování lepší magnetické vlastnosti a menší měrné ztráty než ve směru kolmém. Z toho vyplývá, že magnetický odpor ve směru válcování je malý, ale elektrický odpor napříč válcování je veliký. (4) (5) „Části magnetického obvodu, na kterém je umístěno vinutí, se nazývají jádra nebo sloupce a bývají odstupňováním upraveny do tvaru blízcího se kruhu.“ (1)

Průřezy (tvary) jader závisí na typu a výkonu transformátoru. U malých jednofázových transformátorů se používá jádro obdélníkového průřezu, zatímco u větších výkonů typu plášťového se používá jádro odstupňované. (5) Se zvětšováním průměru jádra se zvětšuje i počet stupňů a to u velikých transformátorů až do deseti stupňů v kvadrantu. (2) S větším počtem stupňů se dosahuje většího průřezu jádra (magnetického obvodu) a tím se dosahuje lepšího využití. (6)



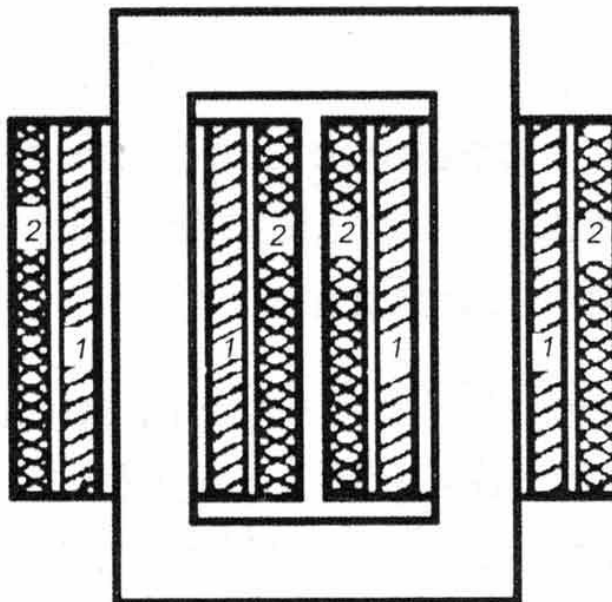
Obr. 4: Odstupňování jádra do blízcího se kruhu (6)

Plechys jsou stříhány a na sebe skládány tak, aby každý další stupeň jádra byl zmenšen a tím se zmenšila vzduchová mezera mezi jádrem a kruhovým vinutím, které je navinuto na toto jádro, viz *Obr. 4.* (6)

Sloupy velikých transformátorů se obvykle provádějí s chladicími kanály, které chladí magnetický obvod. Tyto kanály jsou děleny na kanály podélné a příčné. Kanály podélné jsou rovnoběžné s plechy, hůře chladí, ale jádro se snadněji skládá. Kanály příčné jsou umístěny napříč plechy, lépe chladí, avšak jádro se obtížněji skládá. U příčných kanálů by mohlo dojít k rozpadu jádra na samostatné části, proto příčné kanály nesahají až na povrch sloupu. (5)

1.2.2 Konstrukce vinutí

Druh konstrukce vinutí určují dvě hlavní veličiny, jmenovitý proud a jmenovité napětí transformátoru. Dle velikosti jmenovitého proudu je volen průřez vodičů a popřípadě i počet paralelních větví. Měděné vodiče mohou mít průřezy kruhové, čtyřhranné, obdelníkové nebo čtvercové (pásy). Pro vinutí transformátorů se nejčastěji používají vodiče o průřezech kruhových $0,02 - 10 \text{ mm}^2$ nebo čtyřhranných $6 - 80 \text{ mm}^2$. (2)



Obr. 5: Souosé vinutí jednoduché u jednofázového jádrového transformátoru (14)

Podle jmenovitého napětí transformátoru volíme konstrukci izolace mezi závitů, cívkami a izolaci jednotlivých částí vinutí k dalším vodivým i uzemněným částem transformátoru. (2) Vodiče jsou nejčastěji izolovány lakem, opředeny bavlnou, nebo ovinuty papírovým páskem alespoň dvakrát překrytým a ponořeny do oleje. Pro konstrukci izolace vodičů mezi sebou je nejdůležitější polohové napětí. To je největší napětí, které se může vyskytnout mezi dvěma těsně vedle sebe ležícími vodiči. (5)

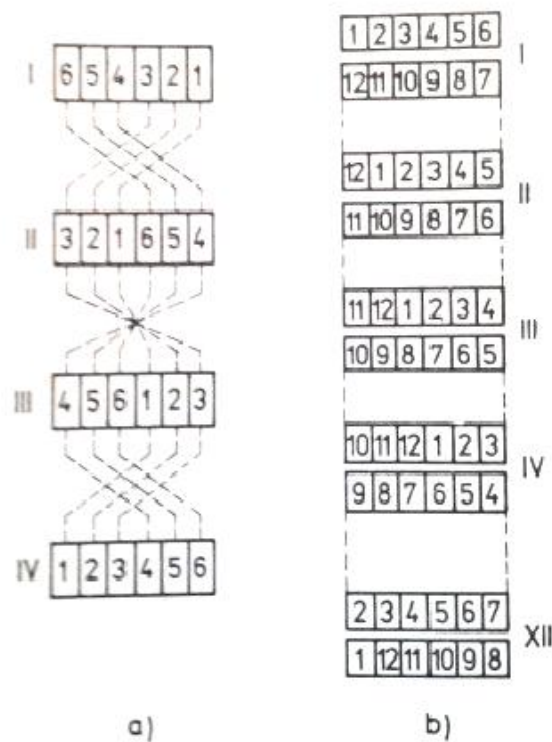
Podle celkového uspořádání a vzájemné polohy vinutí umístěných na jádrech transformátoru rozlišujeme vinutí na sousá (válcová) a prostřídaná (kotoučová).

U sousého jednoduchého vinutí je uloženo vinutí (nn) blíže k železu, protože toto vinutí potřebuje menší izolaci vůči kostře. Soustředně na toto vinutí je uloženo vinutí (vn), (7) jak je naznačeno na Obr. 5. Vzhledem k tloušťce závitové izolace se vinutí (vn) dělí na cívky, které nemají více než 1000 V. (5) Mezi vinutím (nn) a (vn) vzniká kanál, kde proudí chladící medium (olej, vzduch).

„U dvojitého vinutí je vinutí nižšího napětí rozděleno na dvě části, z nichž jedna část vinutí je u jádra a druhá část vinutí je vně, uprostřed je vinutí vyššího napětí. Tato uspořádání mají menší rozptyl, ale konstrukčně složitější izolaci.“ (2)

Plášťové transformátory mívají nejčastěji vinutí prostřídané (kotoučové). Toto vinutí je složeno z cívek (vn) a (nn), která jsou prostřídána po celé délce jádra. (7) To si můžeme představit, jako celé vinutí rozdělené na stejné skupiny, které se skládají z jedné nebo několika cívek vyššího napětí. Tyto cívky jsou umístěny mezi dvěma, nebo několika cívkami nižšího napětí. (2) Abychom dodrželi magnetickou souměrnost, jsou na koncích poloviční cívky (nn), které nepotřebují větší izolaci, tudíž mohou být blíže k železu než cívky (vn). (5)

Jednovrstvé vinutí, které obsahuje více paralelních vodičů, se nejčastěji provádí z několika paralelních čtyřhranných vodičů. (5) *„Pro rovnoměrné rozložení proudu mezi paralelní vodiče je nutné provést jejich vystřídání (transpozici). Při transpozici vodičů se snažíme, aby každý z vodičů proběhl všemi polohami společného vodiče.“ (2)*



Obr. 6: Vystřídání (transpozice) paralelních vodičů v závětech vinutí (2)

Při průřezu vodičů větších než 30 mm^2 se kvůli snížení ztrát musí vodiče dělit na paralelní větve. Velké transformátory mohou mít až 20 a více paralelních vodičů. Jelikož reaktance jednotlivých větví není stejná, nejsou spřaženy se stejným rozptylovým tokem. Větve, které jsou vinuté ve vnitřní vrstvě, blíže k jádru, jsou spřaženy s větším magnetickým tokem než větve, které jsou navinuté na vnějších vrstvách. V každé větvi se indukují jiné napětí a ty se chovají jako paralelně zapojené zdroje. Mezi nimi prochází vyrovnávací proudy. Aby se ve všech větvích indukovalo stejně veliké napětí, musíme dodržet prostřídání (transpozici) vinutí, kdy každá větev prochází všemi polohami a tím je spřažena se stejným tokem. (8)

Zpravidla se tato vinutí používají jako vinutí nižšího napětí při proudech větších než cca 300 A. Jsou dostatečně mechanicky pevné. (2)

1.2.3 Konstrukce olejové nádoby

Konstrukce nádoby závisí na způsobu chlazení transformátoru. Olejové nádoby jsou nejčastěji používány u transformátorů, které jsou chlazené olejem, v nichž je transformátor uložen. (4) Nádoby mohou být hladké, vlnité a trubkové nebo hladké, které mají na stěnách připevněny radiátory s případným ofukováním vnějším vzduchem.

Nádoba je svařena z pláště, z tenkého plechu a tlustého dna. Plášť může být zhotoven z vlnitého plechu, který tvoří chladicí žebra nádoby. Dno nádoby je vyztuženo podélnými žebry a příčnými profily U, na které jsou přišroubované patky, na nichž jsou připevněna ložiska s pojízdny kolečky. (5)



Obr. 7: Olejový transformátor s vlnitou (žebrovou) nádobou a hermeticky uzavřenou dilatační nádobou (9)

Na víku nádoby jsou umístěny porcelánové průchodky, které jsou izolačně přizpůsobené napětí transformátoru. U transformátorů, které nemají nucený oběh chladícího oleje, je nezbytnou součástí konzervátor (dilatační nádoba). (4) Tato dilatační nádoba je upevněna na víku transformátoru, nebo je umístěna na zvláštní konstrukci a je spojená s olejovou nádobou.

Je vybavena olejoznakem pro kontrolu hladiny oleje v nádobě, jímkou kalu a vysoušečem vzduchu, který pohlcuje nežádoucí vlhkost vzduchu, který může do dilatační nádoby vstoupit z okolního prostředí. Některé transformátory mají dilatační nádoby vzduchotěsné, které umožňují prodloužení životnosti oleje. Olejová i dilatační nádoba je konstruována na tlak, který se uvnitř nádob může objevit zvětšením objemu oleje při oteplení. (2)

U větších výkonů transformátorů se do spojovacího potrubí mezi dilatační nádobou a nádobou transformátoru vkládá plynové (Buchholzovo) relé, které chrání transformátor. Toto relé reaguje na vznik plynů v oleji, které se mohou vyvíjet při poruše transformátoru (přetížení vinutí, poškození izolace), nebo v havarijním stavu (zkrat) odpíná transformátor. (4)
(8)

1.3 Rozdělení transformátorů podle způsobu chlazení

Dle ČSN musí mít všechny elektromagnetické netočivé stroje na štítku uveden druh chlazení písmenovou značkou.

- 1) Druh chladiva, které se stýká s vinutím
- 2) Způsob jeho oběhu
- 3) Druh chladiva, které se stýká s vnější chladicí soustavou
- 4) Způsob jeho oběhu

Znaky druhu chlazení

O..... olej

G..... plyn

W..... voda

S..... tuhý izolant

A..... vzduch

Znaky pro způsob oběhu

N..... přirozený

F..... nucený

D..... nucený řízený

Nejčastěji používané transformátory jsou s chlazením ONAN, nebo ONAF. Tyto transformátory mají přirozený oběh oleje s přirozeným oběhem vzduchu, nebo s ofukováním od určitého výkonu.

1.3.1 Typ chlazení ONAN

Aktivní části transformátoru jsou ponořeny do transformátorového oleje, který dobře odvádí vzniklé teplo. Olej přirozeným vztlakem cirkuluje a odvádí teplo z cívek a železa na stěny nádoby, kde se chladí a klesá zpět dolů. (5) U tohoto typu chlazení se nejčastěji používají typy nádob hladká, vlnitá nebo trubková. Typ nádob také závisí na jmenovitém výkonu transformátoru. Pro menší výkony se používá typ nádoby hladká, pro větší výkony trubková. (8)

1.3.2 Typ chlazení ONAF

Olejové transformátory s přirozeným prouděním a ofukováním se používají pro větší výkony, kde se chlazení zlepšuje ofukováním radiátorů vzduchem. (5) Pro tento typ chlazení se nejčastěji používá typ nádoby s radiátory. Radiátory jsou jednoduché výměníky tepla, které jsou přírubami připojeny k nádobě transformátoru a velmi dobře zvětšují chladicí plochu.

Dříve se u tohoto typu chlazení používal jeden společný ventilátor, dnes však má každý radiátor svůj vlastní ventilátor. Ofukování může být příčné, nebo podélné s ventilátory pod radiátory. Ventilátory jsou řízeny automaticky, vypínají se dle zatížení transformátoru. (8)



Obr. 8: Olejový transformátor s radiátory a ventilátory (10)

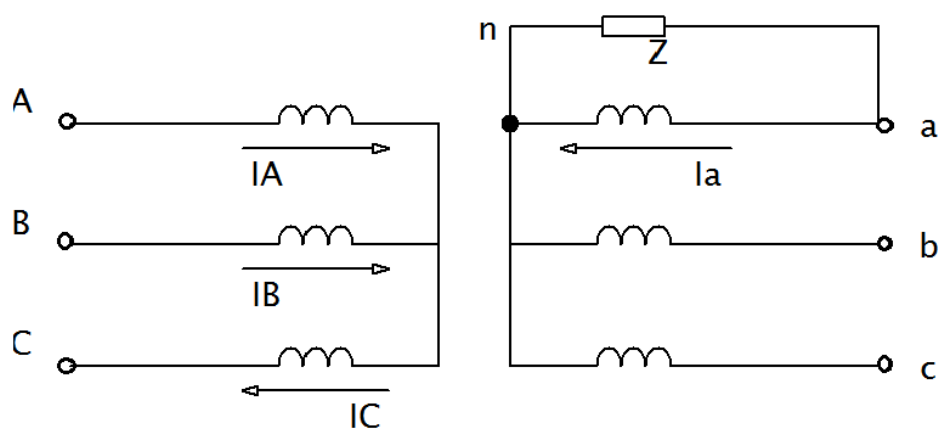
2 Zvláštnosti chodu 3f transformátoru s 1f sekundárním vinutím

2.1 Nesouměrné zatížení trojfázových transformátorů

Proudy na zátěži transformátoru nemusí být vždy symetrické, ale také mohou být někdy nesymetrické. Nesymetrie může být vyvolána velikou jednofázovou zátěží, což mohou být např. elektrické pece, elektrická trakce atd. (11)

V tomto případě dochází k nesouměrnému zatížení, při kterém se mohou vyskytnout v transformátoru nežádoucí jevy, které se jinak při souměrném zatížení neobjevují. Při nesouměrném zatížení třífázových transformátorů je velmi důležitý výpočet proudů a napětí, protože nesouměrnost fázových a síťových napětí má nepříliš příznivý vliv na spotřebitele elektrické energie. Snižuje např. výkon trojfázových motorů. (2)

„Podíváme-li se na tuto záležitost z hlediska souměrných složek (sousedná, zpětná a netočivá), lze usoudit, že transformátor jako netočivý stroj nemění svoje chování pro souslednou a zpětnou složku. Určité potíže však mohou vzniknout vlivem netočivé složky.“ (3) Netočivá složka je závislá na způsobu zapojení a na způsobu provedení magnetického obvodu, jádrového nebo plášťového. Pro nás důležitá netočivá složka může vzniknout vlivem zátěže, jen u vinutí s vyvedeným uzlem. Potom platí: (1)



Obr. 9: Zatížení transformátoru Yyn mezi fází a uzlem

Pro vstupní síťové napětí U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} vždy platí rovnice

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CA} = 0 \quad 2-1$$

Soustava výstupních proudů I_a , I_b a I_c , vyhovuje podmínce

$$I_a + I_b + I_c = I_d \quad 2-2$$

Proud I_d je proud uzavírající se nulovým vodičem, který může vzniknout ve čtyřvodičové soustavě s vyvedeným uzlem. (2) V soustavě třívodičové (s nevyvedeným nulovým uzlem) je vždy

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad 2-3$$

„Řešení takových stavů se obvykle provádí metodou souměrných složek.“ (12) Při vyšetření vlivu nesouměrného zatížení pro různá zapojení vinutí transformátorů můžeme uvažovat, že magnetizační proud I_μ lze oproti zatěžovacím proudům zanedbat. (4)

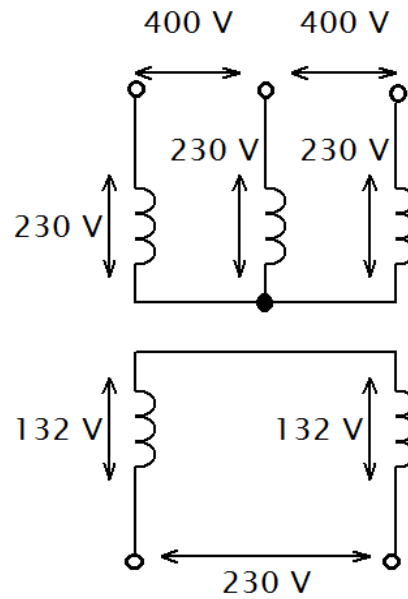
2.1.1 Dvoupólové nesymetrické zatížení v zapojení typu 1

Jedná se o transformátor, který má 3f primární vinutí zapojené do hvězdy a sekundární vinutí tvoří zapojené dvě krajní vinutí do série se zátěží.

Při měření budeme na sekundárním vinutí zatěžovat vždy jen obě krajní jádra, abychom zachovali symetrii magnetického obvodu. V prostředním nezatíženém sloupku, resp. ve vinutí na tomto sloupku, protéká pouze magnetizační proud I_μ .¹

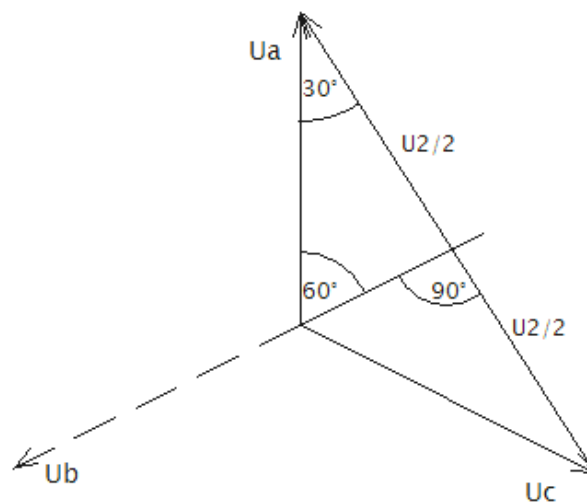
Ze štítku daného transformátoru jsou patrné napěťové poměry primární i sekundární strany. Hodnoty těchto napěťových poměrů jsou zakresleny ve schématu zapojení, viz *Obr. 10*.

¹ Magnetizační proud I_μ lze oproti zatěžovacím proudům zanedbat. Viz kapitola 2.1



Obr. 10: Napěťové poměry ve vinutí transformátoru v zapojení typu 1

Pro odvození sdruženého napětí mezi fázemi „a“ a „c“ na sekundární straně transformátoru jsme použili vektorový diagram napětí, viz Obr. 11. Z diagramu je patrné, že při dvoupólovém zatížení krajních fází, můžeme napětí prostřední fáze U_b zanedbat. Při odvozování z vektorového diagramu víme, že hodnoty U_a a U_c jsou hodnoty fázové. Spojením těchto napětí dostaneme trojúhelník, ze kterého dopočteme sdružené napětí U_2 .



Obr. 11: Vektorový diagram napětí transformátoru v zapojení typu 1

Z pravoúhlého trojúhelníku, můžeme vyjádřit hodnoty pro $\cos 30^\circ$

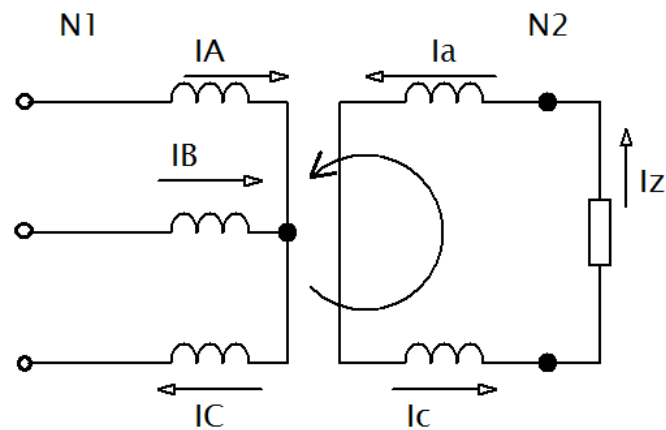
$$\cos 30^\circ = \frac{U_2/2}{U_a} \quad 2-4$$

Víme, že $\cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$. Po upravení dostáváme

$$\frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{U_2}{2U_a} \quad 2-5$$

Z rovnice (2-5) vyjádříme sdružené napětí U_2

$$U_2 = \sqrt{3} * U_a = 230 \text{ V} \quad 2-6$$



Obr. 12: Dvoupólové zatížení v zapojení typu 1

Pro vyšetření velikosti proudů jednotlivých fází sekundární strany vidíme z Obr. 12, že platí

$$I_z = I_a = I_c \quad 2-7$$

Rovnice (2-8) platí pro magnetické napětí ve smyčce

$$-N_1 I_A - N_1 I_C + N_2 I_c + N_2 I_a = 0 \quad 2-8$$

Po použití rovnice (2-7) lze rovnici upravit

$$-N_1 I_A - N_1 I_C + 2N_2 I_z = 0 \quad 2-9$$

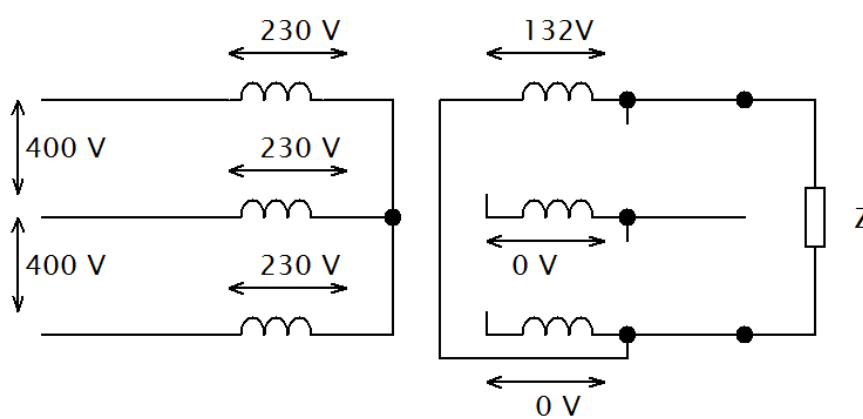
Z rovnice (2-9) můžeme za předpokladu $I_A = I_C$ vypočítat velikost proudů vstupní strany

$$I_A = I_C = \frac{2 * N_2 I_z}{2 * N_1} = \frac{N_2 I_z}{N_1} \quad 2-10$$

2.1.2 Dvoupólové nesymetrické zatížení v zapojení typu 2

Jedná se o transformátor, který má 3f primární vinutí zapojené do hvězdy a sekundární vinutí tvoří zapojené jedno krajní vinutí do série se zátěží.

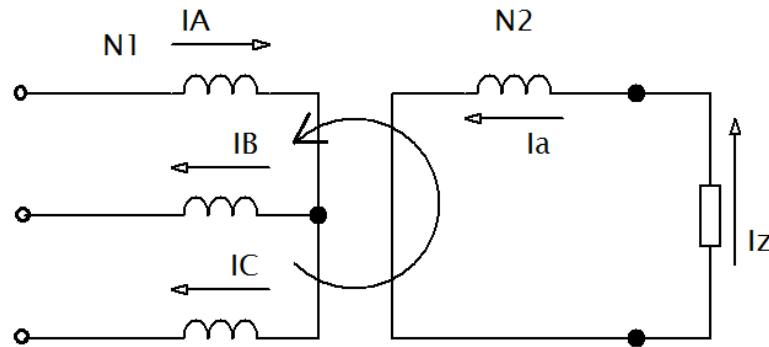
V zapojení typu 2 jsme zatěžovali pouze jedno krajní vinutí. Fáze je na sekundáru pouze jedna stejně jako v zapojení typu 1. Rozdíl je v tom, že zde je fáze tvořena pouze jedním vinutím, zatímco v zapojení typu 1 jsou dvě vinutí v sérii. Na *Obr. 13* vidíme napěťové poměry v zapojení typu 2.



Obr. 13: Napěťové poměry ve vinutí transformátoru v zapojení typu 2

Při zatížení vinutí jedné krajní fáze v zapojení typu 2 můžeme předpokládat, že proud na sekundární straně protéká jen jednou fází.² Zatímco na sekundární straně transformátoru můžeme prostřední vinutí a vinutí na jednom z krajních sloupků “zanedbat“. Na primární straně těmito vinutími protéká poloviční proud zatížené fáze. Po úpravě dostáváme obvod, viz *Obr. 14*.

² V prostředním a v jednom krajním nezatíženém vinutí na sekundární straně neprotéká žádný proud.



Obr. 14: Dvoupólové zatížení v zapojení typu 2

Z Obr. 14 můžeme sestavit rovnici pro magnetické napětí ve smyčce

$$-N_1 I_A + N_2 I_a = 0 \quad 2-11$$

Vidíme, že $I_a = I_z$. Potom můžeme danou rovnici přepsat ve tvaru

$$-N_1 I_A + N_2 I_z = 0 \quad 2-12$$

V sekundárním vinutí, které je navinuto na prostředním sloupku a na jednom z krajních sloupků, neprotéká z důvodu rozpojení žádný proud, proto se proudy vytékající z uzlu primárního vinutí rozdělí na stejné velikosti. Potom můžeme říci, že $I_B = I_C$. Podle I. Kirhoffova zákona můžeme formulovat rovnici, potom pro vstup transformátoru platí $I_A - I_B - I_C = 0$. Dosazením do rovnice (2-12) dostáváme

$$-2I_C N_1 = -I_z N_2 \quad 2-13$$

Potom dostáváme výslednou rovnici pro I_C

$$I_B = I_C = \frac{I_z N_2}{2N_1} \quad 2-14$$

Z rovnice (2-12) je patrné, že proud $I_A = \frac{I_z N_2}{N_1}$, potom můžeme říci že

$$I_B = I_C = \frac{I_z N_2}{2N_1} = \frac{I_A}{2} \quad 2-15$$

Z výpočtů je patrné, že při dvoupólovém zatížení transformátoru v zapojení typu 2 nejsou vstupní síťové proudy I_A a I_C stejné jako u zapojení typu 1. Proud I_C je o polovinu menší než proud v zapojení typu 1. Z tohoto důvodu je zapojení typu 2 vhodnější při větší nesymetrické zátěži.

3 Měření transformátoru

3f Transformátor Yy- štítek

$$S = 900 \text{ VA}$$

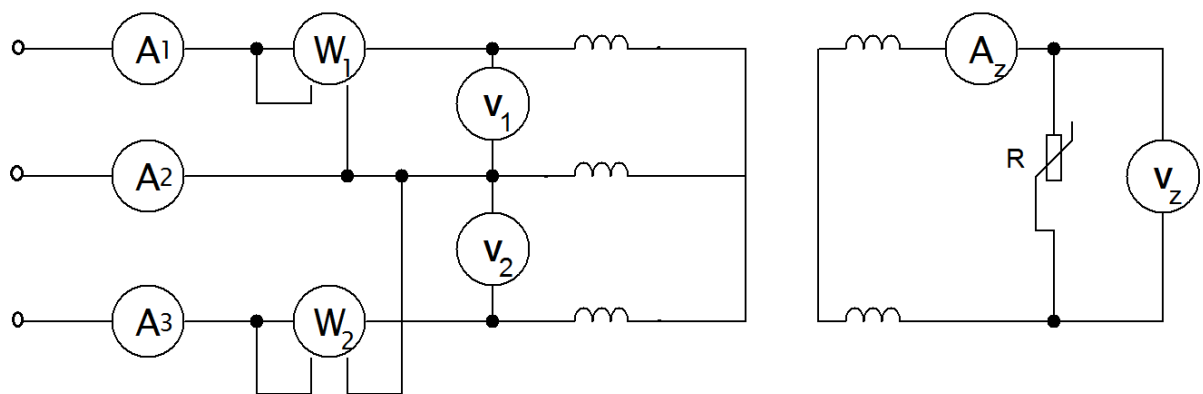
$$U_s = 400/230 \text{ V}$$

$$U_f = 230/132 \text{ V}$$

$$I = 2,26/3,93 \text{ A}$$

3.1 Měření v zapojení typu 1

Při měření jsme zapojili obvod dle Aronova zapojení, viz *Obr. 15*. Do každé fáze jsme vložili ampérmetr, abychom viděli, zda proudy protékající fázemi odpovídají teoretickým úvahám danému zapojení. Na sekundární straně jsme zatížili dvě krajní fáze proměnným rezistorem $R=100\Omega$. Ampérmetrem umístěným na sekundární straně jsme kontrolovali proud, který protéká sekundárním vinutím a zátěží tak, aby vinutím i odporem neprotékal větší proud než dovolený.



Obr. 15: Schéma zapojení pro měření nesymetrie v zapojení typu 1

Z naměřených hodnot dle *Tab. 1* můžeme vidět, že ampérmetrem A_2 prochází téměř nulový proud. Je to způsobeno magnetizací nezátíženého vinutí prostředního sloupku na sekundární straně transformátoru. Za předpokladu, že proud v prostřední fázi zanedbáme, můžeme říci že, $I_A = I_C$.

I _A [A]	I _B [A]	I _C [A]	U ₁ [V]	U ₂ [V]	P ₁ [W]	P ₂ [W]	U _Z [V]	I _Z [A]
0,77	0,04	0,8	230	230	100	90	134	1,2
0,87	0,054	0,9	230	230	110	100	132	1,35
0,96	0,054	1	230	230	120	105	131	1,5
1,1	0,054	1,1	230	230	140	115	132	1,66
1,2	0,054	1,2	230	230	155	130	130	1,9
1,4	0,054	1,4	230	230	180	150	129	2,15
1,5	0,054	1,5	230	230	190	160	128	2,35
1,55	0,054	1,56	230	230	200	170	127	2,5

Tab. 1: Naměřené hodnoty v zapojení typu I

I _A [A]	I _B [A]	I _C [A]	U ₁ [V]	U ₂ [V]	U _Z [V]	I _Z [A]	Z [Ω]	I _{Avyp} [A]
1,33	0,07	1,39	398,4	398,4	232,1	2,1	111,7	1,19
1,51	0,09	1,56	398,4	398,4	228,6	2,3	97,8	1,34
1,66	0,09	1,73	398,4	398,4	226,9	2,6	87,3	1,49
1,91	0,09	1,91	398,4	398,4	228,6	2,9	79,5	1,65
2,08	0,09	2,08	398,4	398,4	225,2	3,3	68,4	1,89
2,42	0,09	2,42	398,4	398,4	223,4	3,7	60,0	2,14
2,60	0,09	2,60	398,4	398,4	221,7	4,1	54,5	2,34
2,68	0,09	2,70	398,4	398,4	220,0	4,3	50,8	2,49

Tab. 2: Přepočtené a doložené hodnoty v zapojení typu I³

Dle rovnice (2-10) můžeme ověřit, zda hodnoty z měření odpovídají hodnotám teoretickým

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{k} \quad 3-1$$

Po dosazení do rovnice za $\frac{N_2}{N_1}$ dle rovnice (3-1) dostáváme rovnici (3-2)

$$I_A = I_C = \frac{2 * N_2 I_Z}{2 * N_1} = \frac{N_2 I_Z}{N_1} = \frac{U_2 I_Z}{U_1} \quad 3-2$$

Do této rovnice dosadíme ze štítku transformátoru primární napětí U₁, sekundární napětí U₂ odpovídajícím napěťovým poměrům dle Obr. 10 a doložíme proud I_{Avyp}, jak je uvedeno v Tab. 2.

³ Jelikož jsme z důvodu omezeného proudu odporem nemohli měřit pro vstupní napětí 400 V, naměřili jsme hodnoty pro vstupní napětí 230 V a následně jsme naměřené hodnoty, tj. (I_A, I_B, I_C, U₁, U₂, U_Z, I_Z) vynásobili $\sqrt{3}$, viz Tab. 2.

$$I_{Avyp} = I_C = \frac{U_2 I_z}{U_1} = \frac{230 * 2,1}{400} = 1,19 \text{ A} \quad 3-3$$

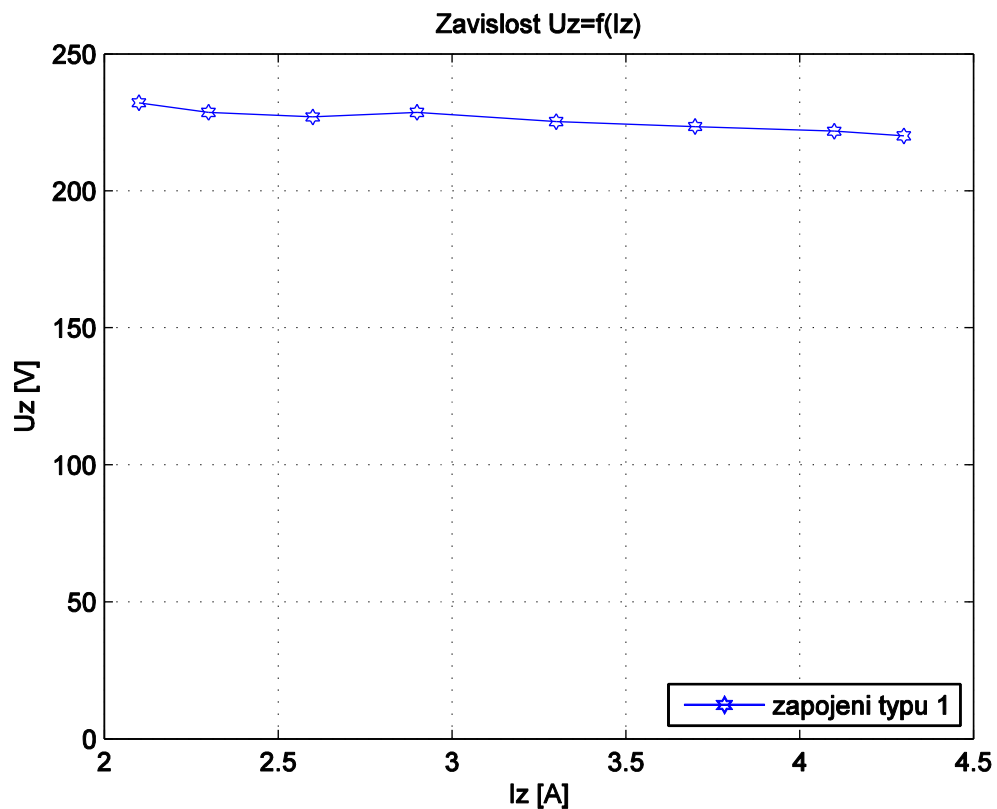
Výpočet úbytku napětí při zapojení typu 1 se rovná napětí viz *Tab. 2* odpovídající jmenovitému proudu $I_N = 3,93 \text{ A}$ odečteme od napětí naprázdno, které je změřeno $U_0 = 237 \text{ V}$

$$\Delta U = U_0 - U_z = 237 - 222,5 = 14,5 \text{ V} \quad 3-4$$

Po dosazení do vztahu pro výpočet úbytku napětí získáváme

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_0} 100 = \frac{14,5}{237} 100 = 6,12\% \quad 3-5$$

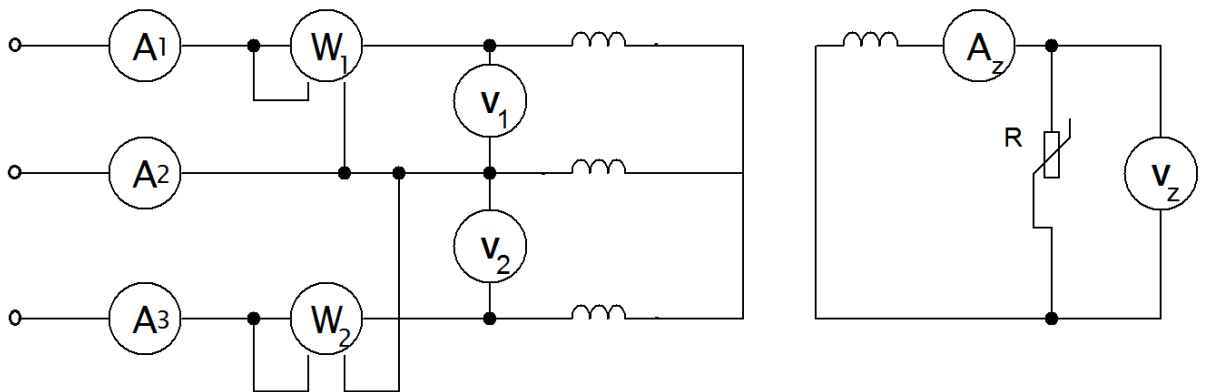
Z přepočtených hodnot změřených na sekundární straně transformátoru jsme vynesli zatěžovací charakteristiku v závislosti $U_z = f(I_z)$.



Obr. 16: Zatěžovací charakteristika v zapojení typu 1

3.2 Měření v zapojení typu 2

U měření v zapojení typu 2, viz *Obr. 17*, jsme dodrželi stejné schéma zapojení jako u měření typu 1, ale na sekundární straně při zatížení dvou krajních fází nám proud protékal pouze přes jedno sekundární vinutí, jak je již naznačeno v kapitole 2.1.2.



Obr. 17: Schéma zapojení pro měření nesymetrie v zapojení typu 2

Z naměřených hodnot dle *Tab. 3* můžeme vidět, že ampérmetrem A_1 prochází vstupní proud a ampérmetry A_2 a A_3 prochází zpět proud téměř rovný polovině vstupního proudu. Je to způsobeno tím, že na sekundární straně při zatížení je zatížena pouze jedna fáze. Za předpokladu, že je zatížena pouze jedna fáze, můžeme říci že, $I_B = I_C$.

I_A [A]	I_B [A]	I_C [A]	U_1 [V]	U_2 [V]	P_1 [W]	P_2 [W]	U_z [V]	I_z [A]
0,35	0,142	0,185	226	230	80	0	78	0,6
0,38	0,158	0,2	226	230	80	0	76	0,7
0,43	0,178	0,23	226	230	80	0	76	0,75
0,46	0,2	0,251	220	230	90	5	76	0,9
0,54	0,24	0,285	228	230	110	5	78	1,15
0,6	0,28	0,32	228	230	130	5	78	1,35
0,7	0,33	0,365	228	230	170	10	78	1,55
0,8	0,375	0,42	228	230	180	0	78	1,8
0,9	0,43	0,47	228	230	200	0	78	2,05
1	0,47	0,51	228	230	220	0	76	2,25
1,2	0,52	0,58	228	230	235	0	76	2,5

Tab. 3: Naměřené hodnoty v zapojení typu 2

I_A [A]	I_B [A]	I_C [A]	U_1 [V]	U_2 [V]	U_z [V]	I_z [A]	Z [Ω]	I_{Cvyp} [A]
0,61	0,25	0,32	391,4	398,4	135,1	1,04	130,0	0,30
0,66	0,27	0,35	391,4	398,4	131,6	1,21	108,6	0,35
0,74	0,31	0,40	391,4	398,4	131,6	1,30	101,3	0,37
0,80	0,35	0,43	381,1	398,4	131,6	1,56	84,4	0,45
0,94	0,42	0,49	394,9	398,4	135,1	1,99	67,8	0,57
1,04	0,48	0,55	394,9	398,4	135,1	2,34	57,8	0,67
1,21	0,57	0,63	394,9	398,4	135,1	2,68	50,3	0,77
1,39	0,65	0,73	394,9	398,4	135,1	3,12	43,3	0,89
1,56	0,74	0,81	394,9	398,4	135,1	3,55	38,0	1,02
1,73	0,81	0,88	394,9	398,4	131,6	3,90	33,8	1,12
2,08	0,90	1,00	394,9	398,4	131,6	4,33	30,4	1,24

Tab. 4: Přepočtené a vypočtené hodnoty v zapojení typu 2⁴

Dle rovnice (2-14) můžeme ověřit, zda hodnoty z měření odpovídají hodnotám teoretickým, tak jako u zapojení typu 1. Po dosazení do rovnice za $\frac{N_2}{N_1}$ dle rovnice (3-1) dostáváme rovnici (3-6)

$$I_C = I_B = \frac{I_z N_2}{2N_1} = \frac{I_z U_2}{2U_1} \quad 3-6$$

Do této rovnice dosadíme ze štítku transformátoru primární napětí U_1 , sekundární napětí U_2 odpovídající napěťovým poměrům dle Obr. 13 a dopočteme proud I_{Cvyp} , jak je uvedeno v Tab. 4.

$$I_{Cvyp} = I_B = \frac{I_z U_2}{2U_1} = \frac{1,04 * 132}{2 * 230} = 0,3 \text{ A} \quad 3-7$$

Výpočet úbytku napětí při zapojení typu 2 se rovná napětí viz Tab. 4 odpovídající jmenovitému proudu $I_N = 3,93 \text{ A}$ odečteme od napětí naprázdno, které je změřeno $U_0 = 138 \text{ V}$

$$\Delta U = U_0 - U_z = 138 - 131,6 = 6,4 \text{ V} \quad 3-8$$

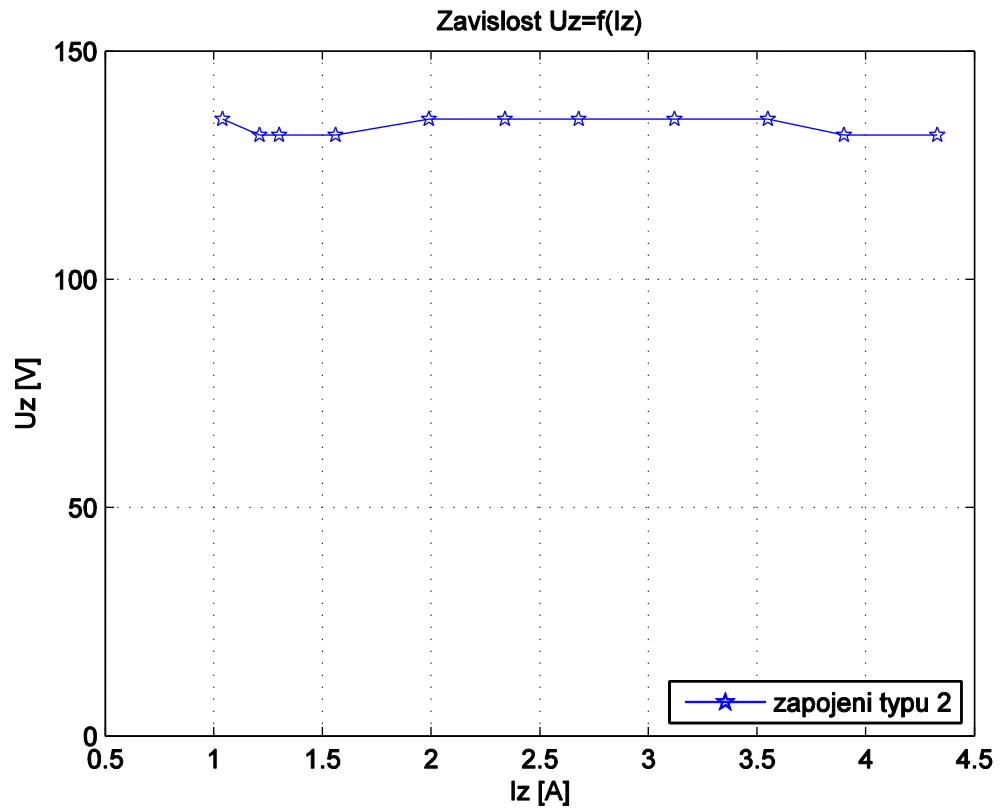
Po dosazení do vztahu pro výpočet úbytku napětí získáváme

⁴ Jelikož jsme z důvodu omezeného proudu odporem nemohli měřit pro vstupní napětí 400 V, naměřili jsme hodnoty pro vstupní napětí 230 V a následně jsme naměřené hodnoty, tj. (I_A , I_B , I_C , U_1 , U_2 , U_z , I_z) vynásobili $\sqrt{3}$, viz Tab. 4

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_0} 100 = \frac{6,4}{138} 100 = 4,64 \%$$

3-9

Z přepočtených hodnot změřených na sekundární straně transformátoru jsme vynesli zatěžovací charakteristiku v závislosti $U_z = f(I_z)$.



Obr. 18: Zatěžovací charakteristika zapojení typu 2

Seznam měřicích přístrojů

Wattmetr W1.....	Metra Blansko	třída přesnosti $\frac{0,5}{\sim}$	ev.č. 1697
Wattmetr W2.....	Metra Blansko	třída přesnosti $\frac{0,5}{\sim}$	ev.č. 5477
Voltmetr V1.....	Metra Blansko	třída přesnosti $\frac{0,5}{\sim}$	ev.č. 1699
Voltmetr V2.....	Metra Blansko	třída přesnosti $\frac{0,5}{\sim}$	ev.č. 1683
Voltmetr V3.....	Metra Blansko	třída přesnosti $\frac{0,5}{\sim}$	ev.č. 1684
Ampérmetr A1.....	Metra Blansko	třída přesnosti $\frac{0,5}{\sim}$	ev.č. 1687
Ampérmetr A2.....	Metra Blansko	třída přesnosti $\frac{1}{\sim}$	ev.č. 9242
Ampérmetr A3.....	Metra Blansko	třída přesnosti $\frac{1}{\sim}$	ev.č. 9243
Předřadný odpor (bočník) ...	Metra Blansko		bez ev. čísla
Zatěžovací rezistor.....	Metra Blansko	2,5 A; 100Ω	ev.č. 1664

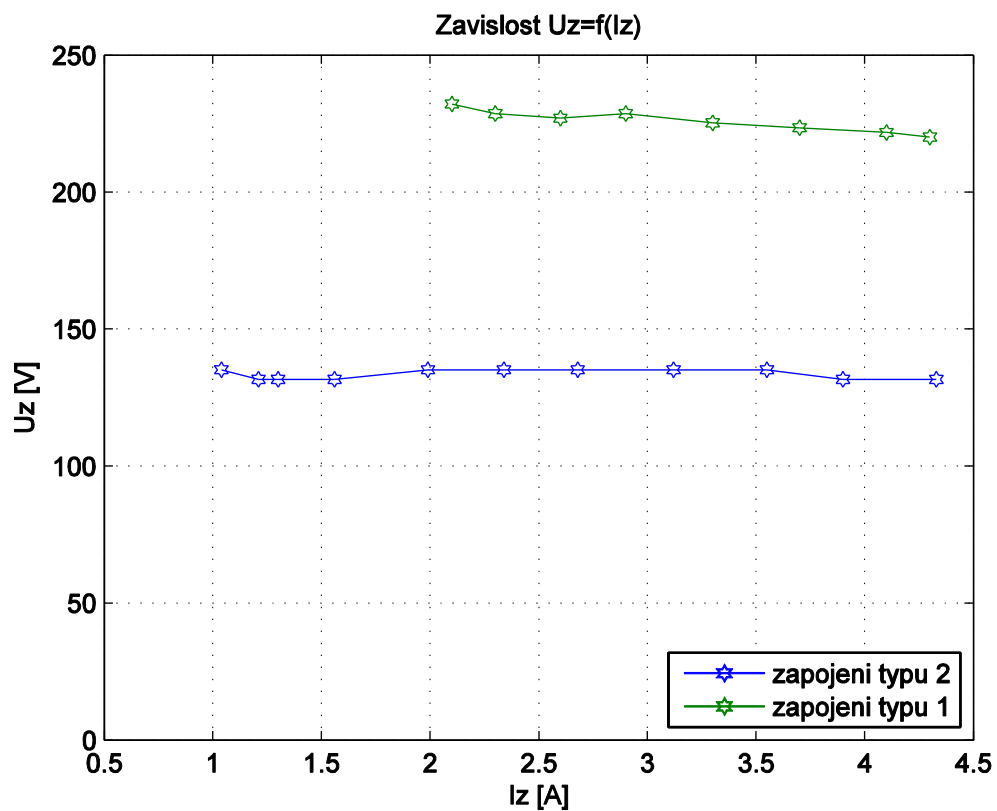
4 Zhodnocení měření

Při zapojení typu 1 jsme podle teorie dospěli ke vztahu $I_A = I_C$. Při měření jsme si tento vztah ověřili. Při zatížení dvou krajních fází jsme dospěli k závěru, že prostřední vinutí na sekundární straně je nezatížené, tudíž sloupkem, na němž je vinutí navinuté, protéká zanedbatelně malý proud, který je třeba k magnetizaci obvodu. Proto tento proud můžeme zanedbat a říci, že proud $I_B = 0$, potom veškerý proud, který dodáváme do uzlu primárního vinutí transformátoru I_A , se musí rovnat proudu, který z uzlu transformátoru vytéká, tudíž $I_A = I_C$.

Při zapojení typu 2 nám vyšel vztah v teoretickém rozboru $I_B = I_C$. Tento proud I_C by měl vyjít podle teorie o polovinu menší než v zapojení typu 1 dle rovnice (2-15), tudíž $I_C = \frac{I_A}{2}$. Je to způsobeno tím, že na sekundární straně je rozpojený trojúhelník a zatížená je pouze jedna krajní fáze. Prostřední a jedna krajní fáze je rozpojená, tudíž proud protékající zátěží protéká pouze jedním sekundárním vinutím. Proto můžeme říci, že $I_B = I_C$. Z výsledků měření lze potvrdit vztah $I_C = \frac{I_A}{2}$. Proto lze toto zapojení typu 2 použít pro větší nesymetrické zatížení než zapojení typu 1.

Ze závěru lze říci, že měření dopadlo podle teoretických předpokladů. Dle zatěžovacích charakteristik čemuž odpovídá *Obr. 19* je vidět, že zapojení typu 1 lze využít pro menší nesymetrické zatížení. Naopak zapojení typu 2 lze v porovnání zatěžovacích charakteristik použít pro větší nesymetrické zátěže. Také je vidět, že při stejném zatížení teče v zapojení typu 2 proud v zátěži přibližně o $\frac{3}{2}$ menší než v zapojení typu 1.

Z úbytků napětí lze říci, že pro stejný jmenovitý proud v zapojení typu 2 je úbytek napětí menší než v zapojení typu 1 při stejném jmenovitém proudu. Proto se transformátor v zapojení typu 2 chová jako tvrdší zdroj napětí.



Obr. 19: Zatěžovací charakteristika pro zapojení typu 1 a zapojení typu 2

Seznam literatury

- [1] **Bartoš, Václav.** *Elektrické stroje I, II.* Plzeň : VŠSE v Plzni, 1986.
- [2] **Petrov, G. N.** *Elektrické stroje 1.* Praha : Academia, nakladatelství Československé akademie věd Praha, 1980.
- [3] **Bartoš, Václav.** *Elektrické stroje.* Plzeň : ZČU Plzeň, 1995. ISBN 80-7082-221-X.
- [4] **Jiří Měřička, Václav Hamata, Petr Voženilek.** *Elektrické stroje.* Praha : Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02109-2.
- [5] **Cigánek, Ladislav.** *Stavba elektrických strojů.* Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1958. L 25b-C3-4-II/5198.
- [6] **Stýskala, Vítězslav.** Stýskala, 2002. <http://search.seznam.cz>. [Online] 19. Říjen 2004. [Citace:12.Únor2014.]
http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_Transformatory%20nazorne%205_1.pdf.
- [7] **Ladislav Cigánek, Miroslav Bauer.** *Elektrické stroje a přístroje.* Praha : Státní nakladatelství technické literatury, n.p., 1957. L25-C2-4-II/5270.
- [8] **Mravec, Rudolf.** *Elektrické stroje a přístroje.* Praha : SNTL, 1982.
- [9] Google image. *Google image.* [Online] VENIO. s.r.o. [Citace: 27. Únor 2014.] <http://www.venio.sk/produkty/transformatory-cg-global/>.
- [10] Google image. *Google image.* [Online] ORGREZ-R a.s. [Citace: 23. Únor 2014.] http://www.orgrez-r.cz/images/tr_16.jpg.
- [11] **Jan Bašta, Jaroslav Chládek, Imrich Mayer.** *Teorie elektrických strojů.* Praha, Bratislava : SNTL nakladatelství technické literatury, nakladatelství ALFA , 1968. L25-C3-IV-41 / 5790-VIII.
- [12] **Bartoš, Václav.** *Teorie elektrických strojů.* Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni , 2006.
- [13] **Kopylov a kolektiv, Igor Petrovič.** *Stavba elektrických strojů.* Praha : SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1988.
- [14] **Krejčí, František.** Google image. *Google image.* [Online] ElektriKa.cz spol. s r.o., 4. Únor 2010. [Citace: 26. Únor 2014.] <http://elektrika.cz/data/clanky/transformatory>.
- [15] Google image. *Google image.* [Online] [Citace: 26. Únor 2014.] <http://www.spsemoh.cz/vyuka/zel/transformatory.htm>.

Seznam obrázků

<i>Obr. 1: Princip činnosti transformátoru, schematické znázornění toků (15)</i>	12
<i>Obr. 2: Průběh magnetického toku a indukovaného napětí</i>	14
<i>Obr. 3: Konstrukce jednofázového plášťového transformátoru (6)</i>	15
<i>Obr. 4: Odstupňování jádra do blížího se kruhu (6)</i>	16
<i>Obr. 5: Souosé vinutí jednoduché u jednofázového jádrového transformátoru (14)</i>	17
<i>Obr. 6: Vystřídání (transpozice) paralelních vodičů v závitech vinutí (2)</i>	19
<i>Obr. 7: Olejový transformátor s vlnitou (žebrovou) nádobou a hermeticky uzavřenou dilatační nádobou (9)</i>	20
<i>Obr. 8: Olejový transformátor s radiátory a ventilátory (10)</i>	23
<i>Obr. 9: Zatížení transformátoru Yyn mezi fází a uzlem</i>	24
<i>Obr. 10: Napěťové poměry ve vinutí transformátoru v zapojení typu 1</i>	26
<i>Obr. 11: Vektorový diagram napětí transformátoru v zapojení typu 1</i>	26
<i>Obr. 12: Dvoupólové zatížení v zapojení typu 1</i>	27
<i>Obr. 13: Napěťové poměry ve vinutí transformátoru v zapojení typu 2</i>	28
<i>Obr. 14: Dvoupólové zatížení v zapojení typu 2</i>	29
<i>Obr. 15: Schéma zapojení pro měření nesymetrie v zapojení typu 1</i>	30
<i>Obr. 16: Zatěžovací charakteristika v zapojení typu 1</i>	32
<i>Obr. 17: Schéma zapojení pro měření nesymetrie v zapojení typu 2</i>	33
<i>Obr. 18: Zatěžovací charakteristika zapojení typu 2</i>	35
<i>Obr. 19: Zatěžovací charakteristika pro zapojení typu 1 a zapojení typu 2</i>	38

Seznam tabulek

<i>Tab. 1: Naměřené hodnoty v zapojení typu 1</i>	31
<i>Tab. 2: Přepočtené a dopočtené hodnoty v zapojení typu 1</i>	31
<i>Tab. 3: Naměřené hodnoty v zapojení typu 2</i>	33
<i>Tab. 4: Přepočtené a vypočtené hodnoty v zapojení typu 2</i>	34