

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Vliv provedení svaru plechu jádra transformátoru na
velikost proudu naprázdno**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

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

Jméno a příjmení: **Jan MYSLIVEC**
Osobní číslo: **E15B0076P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Vliv provedení svaru plechu jádra transformátoru na velikost proudu naprázdno**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Uveďte základní principy funkce transformátoru.
2. Proveďte analýzu vlivu provedení svaru plechu jádra transformátoru na velikost proudu naprázdno, resp. ztrát naprázdno.
3. Proveďte měření proudu naprázdno resp. ztrát naprázdno pro prototypy transformátoru pro různé provedení svaru plechu jádra transformátoru.
4. Proveďte zhodnocení vlivu provedení svaru plechu jádra transformátoru na velikost proudu naprázdno, resp. ztrát naprázdno.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


1. IBLER, Zdeněk a BERAN, Miloš. Elektrárny II. Plzeň: VŠSE, 1982. 269 s.
2. BARTOŠ, Václav. Elektrické stroje. Vyd. 1. Plzeň: Západočeská univerzita, 1995, 221 s. ISBN 80-708-2221-X.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.


Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2018


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na vlastnosti svaru plechu na proud naprázdno transformátoru. Jelikož velikost proudu naprázdno je dána především kvalitou magnetického obvodu transformátoru, který se skládá z transformátorových plechů, má právě svar těchto plechů velký podíl na jeho velikost. V práci je provedeno měření proudů svařovaných plechů při různých svařovacích rychlostech a posuvech. Dále je naměřená hodnota proudu porovnána s hodnotou vypočtenou. V závěru práce je diskutován samotný vliv svaru a vyhodnocení, který typ svaru je pro transformátor nejvhodnější.

Klíčová slova

Transformátor, proud naprázdno, svar, transformátorový plech, transformátorové jádro.

Abstract

The presented bachelor's thesis is focused on the properties of transformer sheets bond for no-load current of a transformer. As the amount of the no-load current depends mainly on the quality of the magnetic circuit of the transformer consisting of the transformer sheets, so the bond of these sheets is essential with respect to the current's amount. In this thesis, there have been the currents of the welded sheets measured in accordance to different welding speeds and advance applied. Furthermore, the measured value of the current is compared to the calculated one. The influence of the bond itself is discussed in the conclusion of the thesis as well as the evaluation which type of the bond is the most suitable for a transformer.

Keywords

Transformer, idle current, weld, transformer plate, transformer core.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 5.6.2018

Jméno příjmení

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janě Jiříčkové, Ph.D. za metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Rostislavu Vlkovi za umožnění svařování a měření transformátorů v laboratoři.

Obsah

ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
SEZNAM OBRÁZKŮ	12
SEZNAM TABULEK	13
1 TRANSFORMÁTOR A PRINCIP ČINNOSTI.....	14
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY	14
1.2 PRINCIP ČINNOSTI TRANSFORMÁTORU.....	15
1.3 ODVOZENÍ INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ	16
1.4 PŘEVOD TRANSFORMÁTORU.....	18
1.5 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU	19
1.6 PRVKY NÁHRADNÍHO SCHÉMATU TRANSFORMÁTORU	20
1.7 PŘEPOČET PRVKŮ NÁHRADNÍHO SCHÉMATU	21
2 STAVY TRANSFORMÁTORU	21
2.1 TRANSFORMÁTOR NAPRÁZDNO	21
2.1.1 Rozbor transformátoru naprázdno	22
2.2 TRANSFORMÁTOR NAKRÁTKO.....	23
2.2.1 Rozbor transformátoru nakrátko	24
3 KONSTRUKCE TRANSFORMÁTORU.....	25
3.1 MAGNETICKÝ OBVOD.....	25
3.1.1 Magnetické vlastnosti látek.....	25
3.1.2 Elektrotechnické plechy.....	26
3.1.3 Magnetizační křivka	28
3.1.4 Měření dynamické hysterezní smyčky	30
3.1.5 Výpočet hysterezních ztrát	34
3.2 VINUTÍ	36
4 ANALÝZY VLIVU PŘEVODNÍ SVAŘOVÁNÍ PLECHU JÁDRA TRANSFORMÁTORU	38
4.1 MĚŘENÍ A SVAŘOVÁNÍ	39
4.2 TESTOVANÝ TRANSFORMÁTOR.....	39
4.3 SVAŘOVÁNÍ.....	40
4.3.1 Svářecí automat.....	41
4.3.2 Průběh svařování.....	42
4.4 MĚŘENÍ NAPRÁZDNO.....	44
4.4.1 Výpočet proudu naprázdno.....	48
ZÁVĚR.....	51
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	52
PŘÍLOHY	1

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na analýzu vlastností svaru transformátorového plechu transformátoru malého výkonu. V práci je popsán průběh svařování a měření proudu naprázdno při různě nastavených parametrech svařování.

V první části se práce zaměřuje na transformátor jako takový. Kromě popisu základního principu činnosti transformátoru je zde také odvozeno indukované napětí a popsány prvky náhradního schématu transformátoru a jeho stavu. Převážně je zde popsán stav naprázdno, ze které vychází samotná analýza vlivu svaru.

Druhá část je zaměřena na magnetický obvod a transformátorové plechy a jejich ztráty. Jelikož ztráty při stavu naprázdno jsou dány převážně hysterezí feromagnetického materiálu, tak jsou zde popsány vlastnosti magnetických látek a jejich dělení a vysvětlení průběhů zmagnetizování feromagnetických látek. Dále je zde teoreticky popsáno měření hysterezní smyčky a výpočet hysterezních ztrát.

Třetí závěrečná část je věnována svařování EI plechů transformátoru. Je zde podrobně popsán proces svařování, nastavování svařovacích proudů a rychlostí posuvu svařovacích elektrod. Dále je provedeno měření proudu naprázdno nesvařeného transformátoru, transformátoru s realizovanou vzduchovou mezerou a svařeného transformátoru. Součástí této části je také zhodnocení samotného vlivu svaru a získaných poznatků z celého měření a svařování.

Seznam symbolů a zkratek

N_1, N_2	Počet závitů na primární, sekundární straně transformátoru (-)
B	Magnetická indukce (T)
ϕ	Magnetický indukční tok (Wb)
ϕ_1	Indukční tok na primární straně transformátoru (Wb)
ϕ_2	Indukční tok na sekundární straně transformátoru (Wb)
$\phi_{1\sigma}$	Rozptylový indukční tok na primární straně transformátoru (Wb)
$\phi_{2\sigma}$	Rozptylový indukční tok na sekundární straně transformátoru (Wb)
ϕ_h	Výslední indukční tok transformátoru (Wb)
I_0	Proud naprázdno transformátoru (A)
H	Intenzita magnetického pole ($\frac{A}{m}$)
E	Intenzita elektrického pole ($\frac{V}{m}$)
U_i	Indukované napětí (V)
I	Elektrický proud (A)
I_1	Elektrický proud tekoucí primární stranou transformátoru (A)
I_2	Elektrický proud tekoucí sekundární stranou transformátoru (A)
P	Činný výkon (W)
R_v	Činný odpor vstupního a výstupního vinutí (Ω)
X_σ	Rozptylová reaktance vstupního výstupního vynutí (Ω)
X_μ	Magnetizační reaktance (Ω)
R_{FE}	Odpor reprezentující ztráty v železe (Ω)
U_{i1}	Indukované napětí na primární straně transformátoru (V)
U_{i2}	Indukované napětí na sekundární straně transformátoru (V)
U_{im}	Amplituda indukovaného harmonického napětí (V)
p	Převod transformátoru (-)
ΔP_{FE}	Ztráty v železe (Ω)
ΔP_{Fev}	Ztráty vířivými proudy (W)
ΔP_H	Ztráty hysterezní (W)
u_k	Napětí nakrátko (%)
ΔP_k	Ztráty nakrátko (W)
φ_k	Účíník nakrátko (-)

R_m	Magnetický odpor (H^{-1})
S	Obsah jádra transformátoru (m^2)
f	Frekvence (Hz)
S_H	Obsah hysterezní smyčky ($\frac{J}{m^3}$)
μ	Permeabilita (H^{-1})
ρ	Hustota materiálu plechů ($\frac{Kg}{m^3}$)
AT	Autotransformátor
k_p	Činitel plnění transformátorových plechů (-)
PS	Proudová sonda
C	Kondenzátor (F)
V	Voltmetr

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 - ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU [5]	16
OBRÁZEK 2 - NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU [5]	20
OBRÁZEK 3 - NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU NAPRÁZDNO A FÁZOROVÝ DIAGRAM[5].....	22
OBRÁZEK 4 - NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU NAKRÁTKO A FÁZOROVÝ DIAGRAM[5]	24
OBRÁZEK 5 - UKÁZKA TRANSFORMÁTOROVÝCH PLECHŮ EI, M, C [1]	27
OBRÁZEK 6 - PRŮŘEZY JÁDRA TRANSFORMÁTORŮ[1].....	27
OBRÁZEK 7 - HYSTEREZNÍ SMYČKA [6].....	29
OBRÁZEK 8 - ZMĚNA POLOHY DOMÉN PŘI ZMĚNĚ INTENZITY MAGNETICKÉHO POLE [2]	30
OBRÁZEK 9 - SCHÉMA ZAPOJENÍ HYSTEREZNÍ SMYČKY	31
OBRÁZEK 10 - HYSTEREZNÍ SMYČKY NĚKTERÝCH MAGNETICKÝCH LÁTEK[2].....	32
OBRÁZEK 11 - ROZDĚLENÍ SMYČKY NA JEDNOTLIVÉ INTERVALY	35
OBRÁZEK 12- TESTOVANÝ NESVAŘENÝ TRANSFORMÁTOR	40
OBRÁZEK 13 - SVAŘOVACÍ AUTOMAT	42
OBRÁZEK 14 - SESKLÁDANÉ PLECHY EI 135, M530-50A BEZ PROVEDENÉHO SVARU.....	43
OBRÁZEK 15 - SVAŘENÉ TRANSFORMÁTOROVÉ PLECHY PROUDEM 145 AMPÉR	43
OBRÁZEK 16 - LEPÍCÍ PÁSKA NALEPENÁ NA PLÍŠKÁCH REPREZENTUJÍCÍ VZDUCHOVOU MEZERU	44
OBRÁZEK 17 - MĚŘENÍ NAPRÁZDNO, SCHÉMA ZAPOJENÍ TRANSFORMÁTORU.....	45
OBRÁZEK 18 - MĚŘENÍ PROUDU NAPRÁZDNO BEZ PROVEDENÉHO SVARU	47
OBRÁZEK 19 - ZÁVISLOST ZMĚNY PROUDU PŘI RŮZNĚ NASTAVENÝCH PARAMETRECH SVAŘOVÁNÍ	47
OBRÁZEK 20 - ZÁVISLOST ZMĚNY PROUDU NAPRÁZDNO NA ZVĚTŠUJÍCÍ SE VZDUCHOVÉ MEZEŘE	48
OBRÁZEK 21 - NÁKRES MAGNETICKÉHO OBVODU.....	49

Seznam tabulek

TABULKA 1 - TEPLTNÍ TŘÍDY IZOLACE TRANSFORMÁTORŮ.....	37
TABULKA 2 - MĚŘENÍ BEZ SVÁRU A VZDUCHOVÉ MEZERY.....	46
TABULKA 3 - TRANSFORMÁTOR S PŘEDEPSANÝMI SVAŘOVANÝMI HODNOTAMI A S REALIZOVANOU VZDUCHOVOU MEZEROU	46
TABULKA 4 - TRANSFORMÁTOR SVAŘOVANÝ STEJNOU RYCHLOSTÍ, RŮZNÝMI PROUDY.....	46
TABULKA 5 - TRANSFORMÁTOR SVAŘOVANÝ RŮZNÝMI RYCHLOSTMI, STEJNÝMI PROUDY	46
TABULKA 6 - TRANSFORMÁTOR SVAŘENÝ VELKÝM SVAŘOVACÍM PROUDEM A NÍZKOU SVAŘOVACÍ RYCHLOSTÍ	46

1 Transformátor a princip činnosti

Transformátor je netočivý stroj, který mění střídavé napětí. Využívá elektromagnetické indukce a transformuje napětí při nezměněné frekvenci. Základ transformátoru je tvořen magnetickým obvodem a cívkami. Další částí transformátoru je jádro. Je to část magnetického obvodu, na kterých jsou umístěny cívky. Cívka o závitech N_1 se nazývá vstupní cívka, nebo také primární vinutí a je připojena na zdroj střídavého napětí. Na cívku o závitech N_2 se připojuje zátěž (spotřebič) a je nazývána jako výstupní cívka.[1]

Tento stroj nachází uplatnění jak ve slaboproudých, tak i v silnoproudých aplikacích a má široký rozsah použití. Pracuje v rozsahu frekvencí blízkých stejnosměrných proudů do stovek MHz, jmenovitého výkonu od mVA až do stovek MVA. Transformátory mohou být dvouvinutové nebo více vinutové. Dělí se také na počet fází, mohou být jedno nebo více fázové. [1]

1.1 Základní pojmy

Transformátor pracuje na principu elektromagnetické indukce, kde velkou roli hraje i magnetické pole.

Mezi základní veličinu proto vedle napětí a proudu patří také magnetická indukce B , jednotka je Tesla (T), která popisuje magnetické pole. Magnetická indukce se projevuje silovými účinky na vodič, kterým protéká proud, nebo magnetický tok vyvolaný proudem. Velikost magnetické indukce závisí na intenzitě magnetického pole a na druhu látky. Pro výpočet magnetické indukce platí vztah:

$$B = \mu * H \quad (1)$$

kde μ je permeabilita a vyjadřuje magnetickou vodivost materiálu a její jednotkou je henry na metr (H/m). Absolutní velikost této veličiny se určí součinem relativní permeability μ_r , která se vyjádří poměrem absolutní magnetické indukce k indukci ve vakuu a permeability vakua μ_0 , jejichž hodnota je definována jako konstanta:

$$\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7} \quad (2)$$

Když magnetické pole projde plochou S kolmo k indukčním čarám, říkáme tomu magnetický tok. Značí se ϕ , jednotkou toky je Weber (Wb) a vyjádří se součinem, kde se násobí plocha a magnetická indukce:

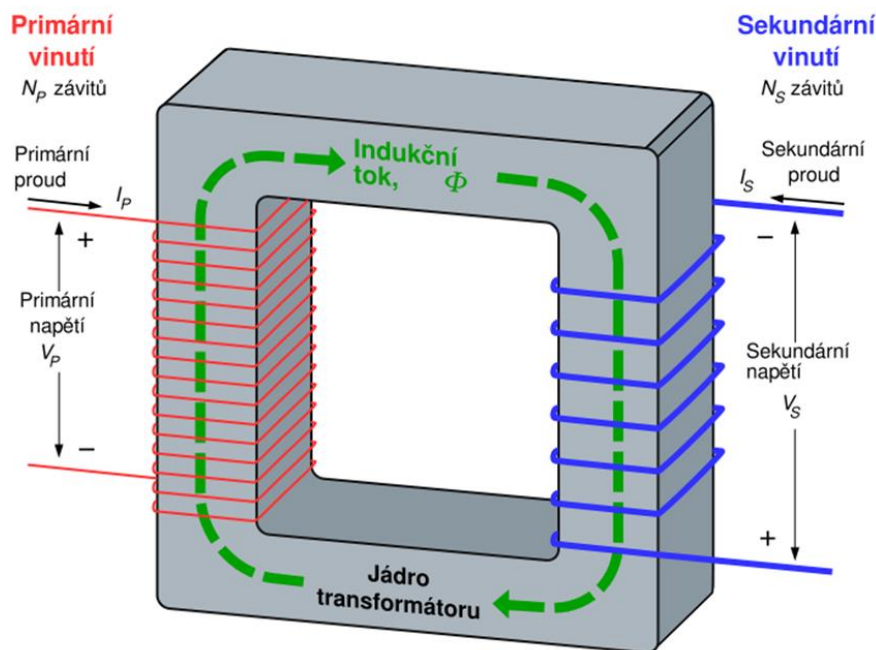
$$\phi = B * S \quad (3)$$

Veličina, která usnadňuje výpočty magnetických obvodů a transformátoru se nazývá intenzita magnetického pole H , jednotka je ampér na metr (A/m). Je dána magnetickým napětím, které je definováno mezi dvěma body indukční čáry. V okolí dlouhého vodiče se tvoří indukční čáry soustředěné do kružnice. Intenzita magnetického pole je dána magnetickým napětím na jednotku délky indukční čáry a je to vektorová veličina, která je v libovolném místě indukční čáry její tečnou. [1, 2] [3]

1.2 Princip činnosti transformátoru

Primárním základem principu činnosti transformátoru je elektromagnetická indukce. Při připojení střídavého napětí U_1 na vstup transformátoru začne primárním vinutím procházet střídavý proud, zpravidla označený I_1 . Tento proud vybudí proměnný střídavý magnetický tok $\phi_1(t)$, který se uzavírá přes jádro transformátoru. Tok protne vinutí cívky na sekundární straně transformátoru a na každém závitě v druhé cívce se začne indukovat napětí. Závity jsou spojeny za sebou a výsledný součet jejich napětí tvoří sekundární napětí U_2 . [4]

Při zatížení transformátoru začne sekundárním vinutím procházet proud I_2 a na výstupní cívce se vybudí magnetický tok $\phi_2(t)$. Jelikož tento tok působí proti toku $\phi_1(t)$, tak se oba tyto toky geometricky sčítají ve výsledný tok $\phi_h(t)$. [4]



Obrázek 1 - Zjednodušené schéma transformátoru [5]

$$\phi_1(t) = \phi_h(t) + \phi_{1\delta}(t) \quad (4)$$

$$\phi_2(t) = \phi_h(t) + \phi_{2\delta}(t) \quad (5)$$

$$\phi_h(t) = \phi_{1h}(t) + \phi_{2h}(t) \quad (6)$$

1.3 Odvození indukovaného napětí

Pro odvození indukovaného napětí předpokládáme časově proměnný napájecí proud i . Platí tedy, že $i = i(t)$. Lze tedy tvrdit, že časově proměnný bude i magnetický tok, který tento proud vybudí $\phi = \phi(t)$. [4]

Pro indukované napětí tedy platí:

$$U_{i1} = N_1 * \frac{d\phi_1(t)}{dt} \quad (7)$$

Stejný vztah platí i pro indukovaná napětí U_{i2}

$$U_{i2} = N_2 * \frac{d\phi_2(t)}{dt} \quad (8)$$

Fyzikální princip šíření toku v magnetickém obvodu vychází z druhé Maxwellovy rovnice:

$$\oint E dl = - \frac{d\phi}{dt} \quad (9)$$

, kde E je vektor intenzity elektrického pole vyjadřující samotnou velikost a směr elektrického pole. Je definován elektrickou silou, která působí na těleso určitým nábojem:

$$E = \frac{F}{Q} \quad (10)$$

Tato Maxwellova rovnice popisuje cirkulaci vektoru intenzity elektrického pole po uzavřené křivce c . Cirkulace tohoto vektoru je rovna záporné časové derivaci magnetického indukčního toku spřaženého s křivkou c . Záporné znaménko u magnetického toku určuje směr proudu, který je ve smyčce indukován. Tento směr je popsán takzvaným *Lenzovým zákonem*.

Tento zákon popisuje, že magnetické pole vytvořené elektrickým proudem se snaží vykompenzovat změny magnetického toku, díky kterému se indukuje proud. Indukovaný proud vytváří magnetické pole, které působí proti změnám magnetického toku, kterým byl vytvořen.

Pro zjednodušení se zavede spřažený tok, jehož velikost je přibližně dána:

$$\psi = N * \phi_{(t)} \quad (11)$$

Tuto rovnici dosadíme dopředného vztahu pro indukované napětí, dostáváme:

$$u_i(t) = \frac{d\psi}{dt} \quad (12)$$

Po dosazení harmonického průběhu toku $\phi(t) = \phi_m * \sin(\omega t + \alpha)$ do rovnice indukovaného napětí dostáváme vztah:

$$u_i(t) = \omega N \phi_m \cos(\omega t + \alpha) = \omega N \phi_m \sin\left(\omega t + \alpha - \frac{\pi}{2}\right) \quad (13)$$

Pro výpočty a další praktické užití je tento vztah upraven na efektivní hodnotu. Tu dostaneme pomocí amplitudy harmonického indukovaného napětí:

$$U_{im} = \omega N \phi_m \quad (14)$$

Výsledná efektivní hodnota napětí:

$$U_i = \frac{U_{im}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N \phi_m = 4,44 N \phi_m f \quad (15)$$

kde:

- U_iefektivní hodnota indukovaného napětí (V)
- Npočet závitů cívky transformátoru (-)
- fkmitočet napájecího napětí (Hz)
- Φmagnetizační indukční tok (Wb)

1.4 Převod transformátoru

Převod patří mezi základní parametry transformátoru. Indukovaná napětí na primární a sekundární značíme U_{1i} a U_{2i} , tyto napětí jsou přímo úměrná počtu závitů primární strany N_1 a sekundární strany N_2 . Z této úvahy můžeme odvodit vztah:

$$U_{1i} = U_i * N_1, U_{2i} = U_i * N_2 \quad (16)$$

Když tyto indukovaná napětí dáme do poměru, dostaneme převod napětí:

$$\frac{U_{1i}}{U_{2i}} = \frac{N_1}{N_2} = p \quad (17)$$

Když je transformátor nezatížený, tak se indukované napětí na primární straně rovná vstupnímu napětí U_1 a indukované napětí na sekundární straně je stejné jako napětí výstupní, tedy U_2 .

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (18)$$

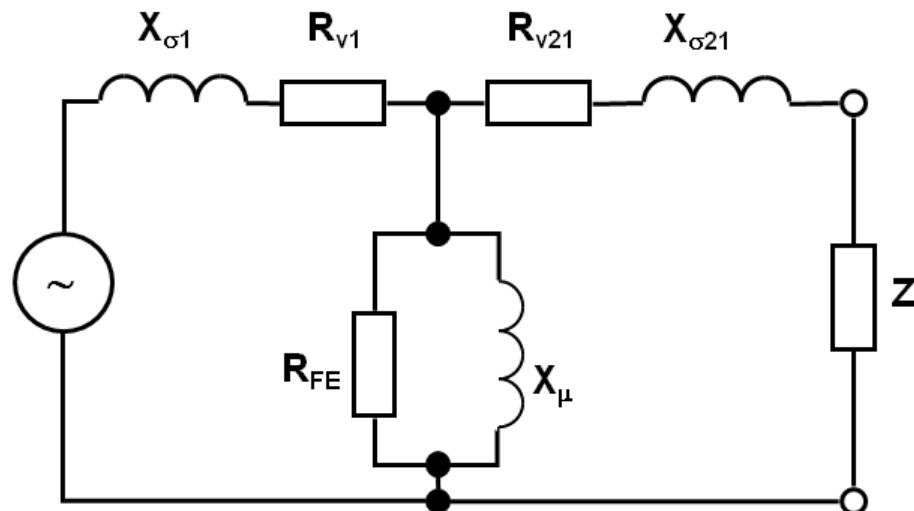
Pokud převod transformátoru vyjde menší než jedna, jedná se o transformátor zvyšovací, protože na výstupní straně transformátoru je větší napětí než na straně vstupní. Rovná – li se poměr transformátoru jedné, jedná se o transformátor oddělovací, který napětí nějak netransformuje, ale slouží k přenosu energie mezi dvěma obvody, u nichž není galvanické spojení. Transformátor snižovací má hodnotu převodu větší než jedna a napětí na sekundární straně je nižší než je na straně primární.

1.5 Náhradní schéma transformátoru

Náhradní schéma transformátoru slouží k rozboru všech provozních stavů transformátoru – transformátor nakrátko, naprázdno a transformátor zatížený. Ve schématu musí být zahrnuty všechny vlastnosti transformátoru, které ovlivňují samotný chod transformátoru. Tyto vlivy jsou zastoupeny kombinací pasivních prvků (odporů a indukčností). [5]

Pomocí matematických postupů a znalosti Kirchhoffových zákonů získáme prvky náhradního schématu, které poté lze přepočítat na skutečné prvky transformátoru.

Pro rozbor transformátoru je použito náhradní schéma ve tvaru T – článku.



Obrázek 2 - Náhradní schéma transformátoru [5]

1.6 Prvky náhradního schématu transformátoru

Transformátor rozdělíme na dvě části. Na část magnetickou, která respektuje magnetický obvod transformátoru a část zahrnující vinutí.

Podélné parametry transformátoru reprezentují vlastnosti vinutí transformátoru.

Prvky zastupující vinutí transformátoru jsou:

$R_v (\Omega)$ - činný odpor výstupního a vstupního vinutí. Každý vodič má svůj odpor, který je dán jeho délkou, průřezem a jeho materiálem. Odpor je také závislý na teplotě.

$X_{\sigma} (\Omega)$ - Rozptylová reaktance vstupního a výstupního vinutí. Tato reaktance označuje magnetický tok, který se uzavírá mimo magnetický obvod transformátoru.

Tyto prvky jsou označovány jako podélné parametry v náhradním schématu

Prvky zastupující magnetický obvod transformátoru jsou:

$X_{\mu} (\Omega)$ - Magnetizační reaktance. Znázorňuje konečnou magnetickou vodivost magnetického obvodu.

$R_{FE} (\Omega)$ - Ztráty v železe. Zahrnují se zde ztráty vířivými proudy a ztráty

hysterezní. Podrobný rozbor ztrát transformátoru je popsán v pozdější kapitole.[5]

1.7 Přepočítání prvků náhradního schématu

Jelikož máme primární a sekundární stranu vinutí, tak i podélné prvky zastupující vinutí musíme rozdělit na dvě části, aby každý prvek zastupoval stranu primární a sekundární. Příčné prvky, tedy magnetizační reaktanci a odpor zastupující ztráty v železe, se nerozdělují, jelikož je magnetický obvod transformátoru stejný jak pro stranu sekundární, tak pro stranu primární.

Aby se mohlo náhradní schéma nakreslit a poté jednotlivé parametry (reaktance a odpory primární a sekundární strany) vypočítat, je nutné nejdříve prvky sekundární strany transformátoru přepočítat na stranu primární strany, protože náhradní schéma platí pro převod $p = 1$. Přepočítat prvky náhradního schématu lze jednoduše přes převodní vztahy transformátoru a skutečné hodnoty napětí a proudů získáme takto:

$$U'_2 = k * U_2 \quad (19)$$

$$I'_2 = k * I_2 \quad (20)$$

$$Z'_2 = k^2 * Z_2 \quad (21)$$

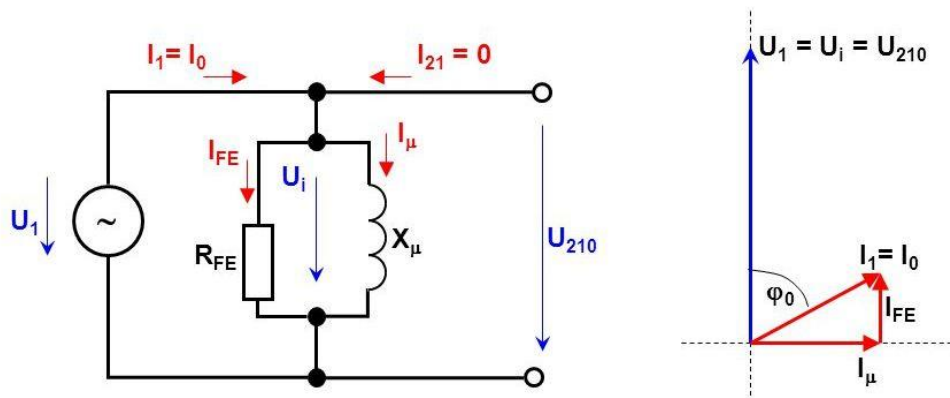
2 Stavy transformátoru

Transformátor může pracovat ve třech provozních stavech – nakrátko, naprázdno a při zatížení. Při zvětšování zatěžovacího proudu pracuje transformátor při zatížení až do jmenovitého proudu. Stav nakrátko, je stav mezní. Působení tohoto proudu je nutné časově omezit. Pro představu se transformátor chová jako obecný zdroj napětí a vlastnosti transformátoru lze vyčíst ze zatěžovací charakteristiky. Ve stavu naprázdno je svorkové napětí nejvyšší, transformátorem neprotéká žádný proud. Ve stavu nakrátko jsou výstupní svorky zkratovány a napětí je téměř nulové.[1, 5]

2.1 Transformátor naprázdno

Chod naprázdno transformátoru znamená, že jsou svorky sekundární strany rozpojeny

a transformátorem prochází proud naprázdno. Měření provádíme do hodnoty sto třiceti procent jmenovitého napětí. Měří se proud naprázdno I_0 , napětí naprázdno U_0 a výkon naprázdno P_{10} .



Obrázek 3 - Náhradní schéma transformátoru naprázdno a fázorový diagram[5]

2.1.1 Rozbor transformátoru naprázdno

Tento proud je velmi malý, přibližně $I_0 = (1 - 10)\% I_n$. Výjimku tvoří velké transformátory, u nichž může proud naprázdno dosáhnout až 40% hodnoty jmenovitého proudu. Jelikož jsou výstupní svorky transformátoru rozpojeny, neprotéká sekundární stranou žádný proud a napětí na výstupu se rovná napětí na příčných prvcích, $I_2 = 0$, $U_2 = U_i$. Jelikož je proud naprázdno oproti jmenovitému proud malý, můžeme v náhradním schématu zanedbat vliv podélných prvků, tj. *činný odpor vinutí* a *rozptylová reaktance*. Tyto prvky se nezanedbávají pouze v případě, kdy hovoříme o malých transformátorech.

Účinník při stavu naprázdno je u transformátorů rozdílný. Je především závislý na ztrátách naprázdno, které budou popsány v následujícím odstavci a na proudu naprázdno. Pohybuje se v rozmezí hodnot od 0,1 do 0,7. Jelikož je účinník malý, tak transformátor odebírá více jalové energie a to zatěžuje síť. Energie způsobuje značné ztráty na vedení a úbytky napětí. Z tohoto důvodu by se měl chod činnosti transformátoru naprázdno co nejvíce omezit.

Základním předpokladem je, že příkon transformátoru ve stavu naprázdno je roven celkovým ztrátám transformátoru naprázdno. Proud naprázdno protéká primárním vinutím a způsobuje v něm ztráty. Těmto ztrátám se říká Joulovy ztráty, nebo ztráty ve vinutí.

Značí se ΔP_{10} . Druhou složkou ztrát jsou ztráty v magnetickém obvodu – ztráty v železe (ΔP_{FE}). Jelikož je proud ve stavu naprázdno malý, jsou ztráty v primárním vinutí zanedbatelné a lze tedy tvrdit, že $\Delta P_{10} \ll \Delta P_{FE}$.

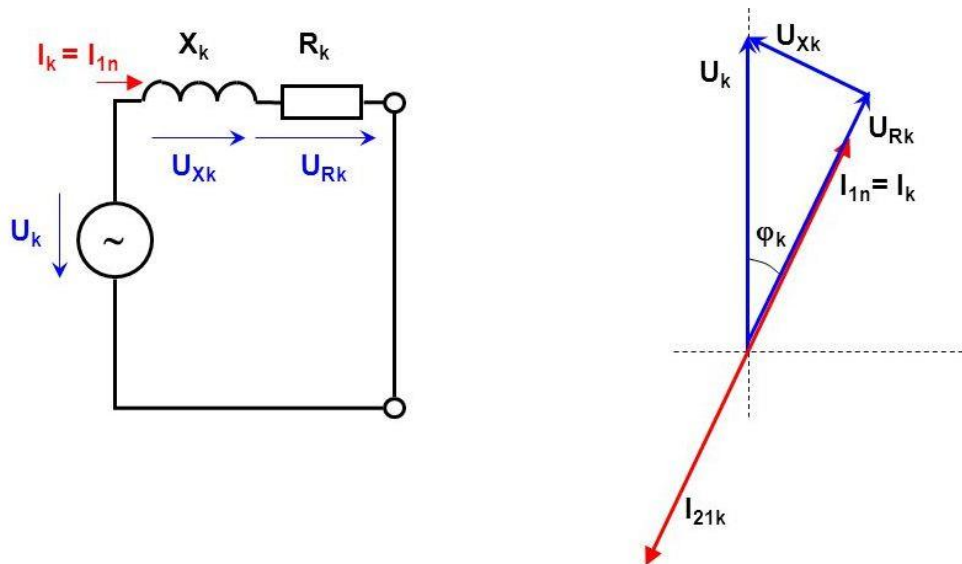
Ztráty naprázdno jsou tedy rovny ztrátám v železe. Tyto ztráty se dělí na dvě části – ztráty *hysterezní* (ΔP_H) a ztráty *vířivými proudy* (ΔP_v).

Velikost *hysterezních ztrát* závisí zejména na použitém materiálu. Každý magnetický materiál má svou hysterezní křivku, která vyjadřuje závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole. Ztráty jsou úměrné ploše uzavřené smyčkou a lze je spočítat integrací. Ztráty vznikají při přemagnetování daného materiálu střídavým polem. Ztráty se mění v teplo díky energii dodané feromagnetickým látkám na magnetování. Nejlepším materiálem jsou amorfní plechy, které mají nejnižší ztráty a používají se na transformátory velkých výkonů. Naopak nejvyšší ztráty mají plechy válcované za studena, které jsou univerzální a nejlevnější. Hysterezní ztráty jsou závislé taky na frekvenci a to lineárně – se vzrůstající frekvencí rostou i ztráty. Ztráty závisí také na indukci, kde je přibližně kvadratická závislost.

Ztráty *vířivými proudy* značíme ΔP_{Fev} . Vířivé proudy vznikají ve vodičích při střídavém magnetování v časově proměnném magnetickém poli. Tyto proudy způsobují tepelné ztráty. Jejich směr nelze z přesností určit, ale mají většinou charakter proudových smyček a jsou příčinou povrchového jevu (skinefektu). Vzorec pro výpočet těchto ztrát se spočítá takto: $\Delta P_{Fev} = B^2 f^2$, písmenem B se značí magnetická indukce. Tyto ztráty jsou nezávislé na zatížení, proto je nazýváme ztráty naprázdno. Ztráty vířivými proudy lze omezit zvýšením elektrického odporu, to je realizováno listěným provedením jader transformátoru a také použitím křemíku. Křemík se přidává do materiálu plechů z důvodu snížení celkové elektrické vodivosti a jeho podíl je přibližně 5%.

2.2 Transformátor nakrátko

Tento stav znamená, že výstupní svorky transformátoru jsou spojeny zkrátka – jsou zkratovány. Výstupní napětí transformátoru je nulové a sekundární stranou prochází maximální možný proud. Příčné parametry náhradního schématu jsou zanedbány. Měří se napětí nakrátko U_k , proud nakrátko I_k a výkon nakrátko.



Obrázek 4 - Náhradní schéma transformátoru nakrátko a fázorový diagram[5]

Tento režim je za normálního provozu nežádoucí, transformátorem prochází zkratový proud, který působí na transformátor destruktivními účinky.

2.2.1 Rozbor transformátoru nakrátko

Napětí nakrátko patří mezi hlavní parametry transformátoru s ohledem na jeho zkratové schopnosti. Měří se na vstupních svorkách transformátoru a je to napětí, při kterém prochází obvodem jmenovitý proud.

$$u_k = \frac{U_{kn}}{U_n} = \frac{I_n}{U_n} \frac{U_k}{I_k} = \frac{Z_k}{Z_n} = z_k \quad (22)$$

Kde:

U_knapětí nakrátko transformátoru (%)

I_njmenovitý proud transformátoru (A)

U_njmenovité napětí transformátoru (V)

Z_kimpedance nakrátko transformátoru (%)

Hodnota napětí se udává v % a pohybuje se v rozsahu od 4 – 12 %. Pro malé transformátory odpovídá menší hodnota napětí nakrátko, pro transformátory velkých výkonů je hodnota kolem 11%, ojediněle může být až 30%. Z předchozího vzorce je patrné, že se napětí nakrátko rovná impedanci nakrátko, to znamená, že když je napětí nakrátko menší, má menší impedanci a transformátor je tvrdší zdroj. Nevýhodou je, že

menší impedancí má transformátor horší odolnost proti zkratům.

Velikost účinníku φ_k nakrátko je značně rozdílná. Pohybuje se v rozsahu mezi 0,7 až 0,9. Jeho velikost se určuje podílem činné a jalové složky impedance transformátoru.

Ztráty nakrátko kryjí nejvíce Joulovy ztráty. Vznikají proudem a odporem vinutí. Tyto ztráty lze změřit wattmetrem nebo je lze určit výpočtem:

$$\Delta P_k = R_1 * I_1^2 + R_{21} * I_{21}^2 \quad (23)$$

Ztráty nakrátko jsou obecně větší než ztráty naprázdno. Většinou platí, že ztráty nakrátko jsou 2,5 – 4 krát větší než ztráty naprázdno.

3 Konstrukce transformátoru

Transformátory se skládají ze dvou hlavních částí, magnetického obvodu a vinutí navinuté na něm.

3.1 Magnetický obvod

Pro magnetický obvod transformátorů se používají látky feromagnetické, které jsou tvořené domény. Další látky, které existují, jsou diamagnetické, a paramagnetické. V další kapitole jsou popsány druhy magnetických látek. [2]

3.1.1 Magnetické vlastnosti látek

Magnetické vlastnosti látek určujeme podle toho, jak na ně působí magnetické pole. V látkách jsou atomy, a elektrony v nich vytvářejí výsledné magnetické pole. Podle uspořádání těchto elektronů dělíme magnetické látky následujícím způsobem:

Nemagnetické látky - Tyto látky dělíme na diamagnetické a paramagnetické. Diamagnetické látky mají permeabilitu o něco málo nižší než jedna a vnější pole mírně zeslabují a jsou z magnetického pole vypuzovány. Paramagnetické látky mají permeabilitu o něco málo větší než jedna a vnější pole mírně zesilují. Látky jsou vtahovány do vnějšího magnetického pole. Mezi diamagnetické látky lze řadit například síru, vodu a měď. Látky paramagnetické jsou látky jako kyslík, sodík a hliník.[6]

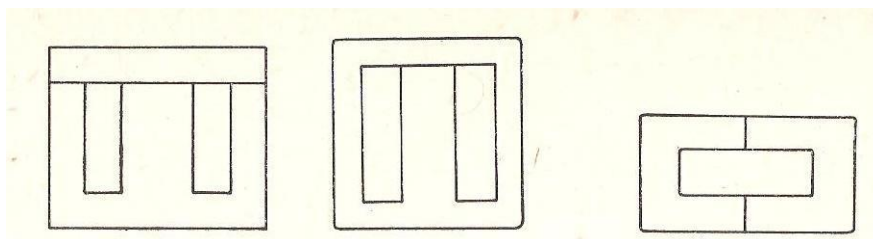
Magnetické látky – Tyto látky jsou nazývány feromagnetické, uvnitř těchto látek jsou atomy uspořádané tak, že výrazně zesilují i slabé magnetické pole a jsou vtahovány do něj. Mají permeabilitu větší než jedna a lze je trvale zmagnetovat. Mezi tyto látky patří hlavně železo, které se v upravené podobě používá pro transformátory, dále kobalt a například nikl.[6]

3.1.2 Elektrotechnické plechy

U malých transformátoru je jádro složeno z elektrotechnických plechů, které jsou alespoň jednostranně izolovány. Plechy se zhotovují z elektrotechnické oceli a nejčastěji se používají plechy, které jsou válcované za tepla. Tyto plechy mají velkou magnetickou indukci, až 1,8T. To je velká výhoda, protože se může zvolit menší průřez jádra, což je ekonomicky výhodnější. Dříve se plechy izolovaly olepeným papírem, nyní se plechy izolují pomocí nanesené fosfátové vrstvy. Nejčastější tloušťka plechu pro nízkofrekvenční aplikace je 0,5 mm a pro aplikace vysokofrekvenční je tloušťka plechu tenčí, většinou se používají plechy s tloušťkou 0,35 mm. Malé transformátory se používají nejčastěji pro rozhlasové přijímače, televizory a taky pro sdělovací zařízení. [1]

Jádra, složená z těchto plechů mají různé tvary. Nejčastější tvar jádra transformátoru je typ EI, poté typ M a typ C.

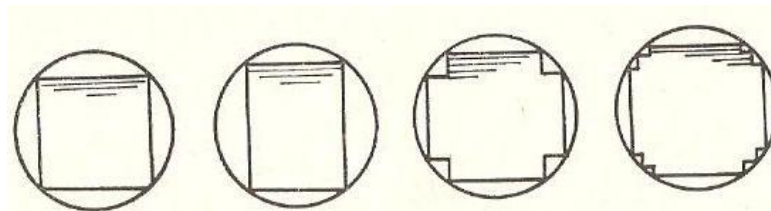
Plechů typu EI jsou válcované za studena. Tato technika má výhodu tu, že plechy mají nižší ztráty, zvláště hysterezní. Lisují se a nevzniká přitom žádný odpad, proto se tyto plechy označují za bezodpadové. Jsou propracované a technologicky dobře ovladatelné, mají přibližně stejné magnetické vlastnosti ve směru válcování, tak i kolmo. Přesné rozměry těchto plechů jsou dány normou ČSN EN 60740-1. Za písmeny EI je číselný údaj, který značí šířku středního sloupku transformátoru v milimetrech. Další čísla určují wattové ztráty na kilogram a šířku jednoho plechu. Značení může v praxi vypadat například takto: EI M530-50A. Číslo 530 určuje ztráty, které v tomto případě jsou 5,3 W/kg a číslo 50 určuje tloušťku plechu, která je 0,5mm. Zbylé geometrické rozměry se poté dají z tohoto čísla odvodit. [2]



Obrázek 5- Ukázka transformátorových plechů EI, M, C [1]

U transformátorů velkých je magnetický obvod složen z pásů elektrotechnického plechu, které jsou složeny tak, aby vznikl magnetický obvod pro jednofázový či trojfázový plášťový transformátor nebo pro jednofázový či trojfázový jádrový transformátor. Dotek mezi jednotlivými plechy se vždy překryje další vrstvou. U plášťových transformátoru obklopují plechy vinutí a u transformátorů jádrových je vinutí na prostředním sloupku a obklopují ho plechy.[1]

U malých transformátorů je průřez jádra obdélníkový, anebo čtvercový. Křížový anebo odstupňovaný je u transformátorů velkých, aby se kruhový otvor cívky co nejvíce vyplnil.[1]



Obrázek 6 - Průřezy jádra transformátorů[1]

Jak je již zmíněno na začátku kapitoly, plechy jsou vzájemně izolovány. Jako izolace se používá hedvábný papír tloušťky 0,03 mm nebo vrstva laku či oxidační nátěr z vodního skla. [1]

Jelikož musí být magnetický obvod pevný, tak se u malých transformátorů plechy na několika místech stáhnou zvláštním přípravkem a na několika částech se ovinou bandáží a ta se ovine provazem. Magnetické obvody transformátorů velkých se stahují pomocí přiložených desek nebo rámu a nosníků.[1]

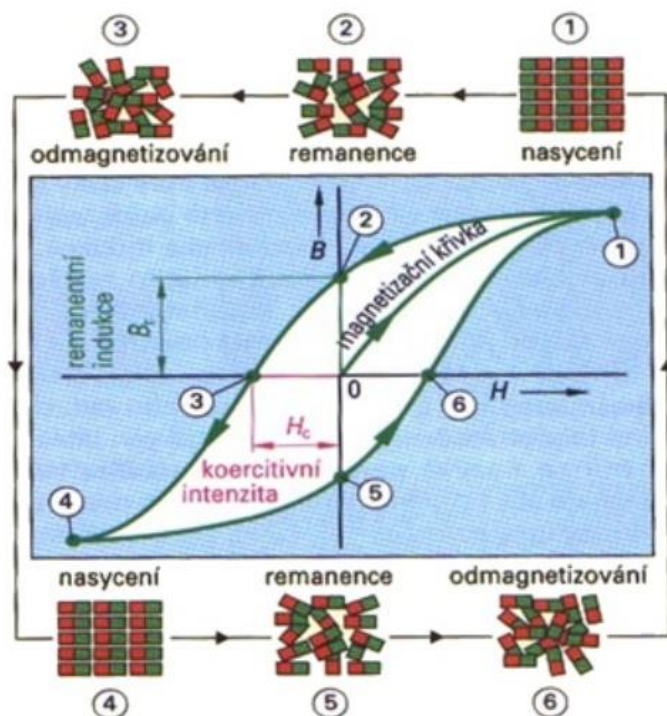
Všeobecně zpracování plechů a vliv mechanického zpracování se silně projevuje na celkových ztrátách magnetického materiálu. Ztráty způsobené magnetickým materiálem

jádra u transformátorů s výkonem 100 kVA jsou přibližně padesáti procentní ze ztrát celkových. Ztráty 25-ti procentní magnetického jádra mají transformátory s výkonem nad 10 kVA. U transformátorů do 1 kVA je podíl ztrát v jádru okolo deseti procent. Kvalitní plechy se uplatňují proto spíše s výrobou velkých transformátorů. Při výrobě malých transformátorů se plechy volí spíše z hlediska ekonomického. [2]

3.1.3 Magnetizační křivka

Důležitým ukazatelem vlastností magnetických materiálů je hysterezní smyčka. Smyčka ukazuje závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole. Existují různé tvary smyček, které závisí na použitém materiálu. Tvar smyček je udáván v katalogích výrobců a je neproměnný. Závisí především na použitém materiálu. Hysterezní křivka se získává z cyklu magnetování, kdy se k magnetickému materiálu přikládá vnější magnetické pole.

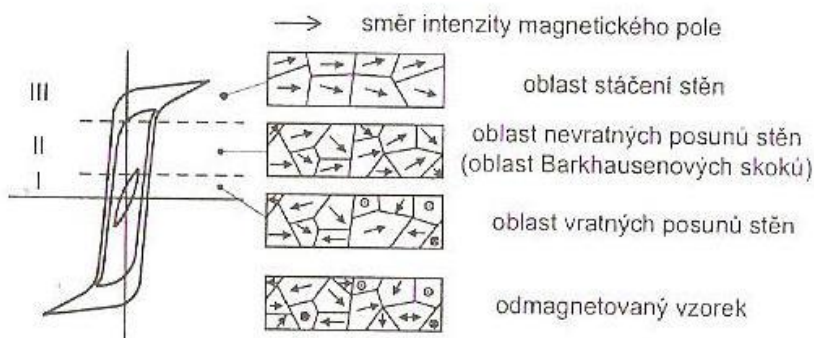
Když přiložíme vnější magnetické pole k feromagnetickému materiálu, který předtím nebyl nikdy zmagnetován, tak říkáme tomuto jevu prvotní magnetizace a končí v oblasti nasycení, kdy už není možné zvyšovat magnetickou indukci a zvyšuje se jen intenzita magnetického pole. Když vnější magnetické pole zanikne, je feromagnetikum ještě částečně zmagnetizované a to se projeví remanentní, zbytkovou indukcí. Pro úplný zánik magnetického pole působíme na feromagnetikum polem opačným, než původně. Toto pole má intenzitu nazvanou koercitivní intenzita. Při zvyšování intenzity feromagnetikum znovu zmagnetizujeme, ale jeho magnetické póly budou opačné. Po další změně směru vnějšího magnetického pole opět látku demagnetizujeme a hysterezní smyčka se uzavře. [6]



Obrázek 7 - Hysterezní smyčka [6]

U feromagnetických látek bez vnějšího magnetického pole jsou domény v látce orientovány náhodně a výsledný magnetický moment je nulový. Se vzrůstající intenzitou se magnetická polarizace mění vzrůstem těchto domén a jejich směr je nejbližší směru působícího pole. Když vnější pole ještě zesílí, dojde k nevratným přeskokům domén do směru působení vnějšího magnetického pole. Při poklesu vnějšího pole již nedochází k návratu domén do původní orientace v látce. Když se dále zvyšuje intenzita vnějšího magnetického pole, dostává se látka mimo oblast využití, látka je nasycena a magnetizace se nezvyší. Nejeftivnější oblastí využití je oblast II, kde je průběh magnetovací křivky nejstrmější a nejlineárnější. [2]

Plocha této hysterezní smyčky je úměrná práci, která byla potřeba k natočení dipólů v magnetické látce. Při přemagnetování vzniká teplo vlivem tření a energie k jeho překonání se mění v teplo, které způsobuje ztráty zvané Hysterezní ztráty. [2]



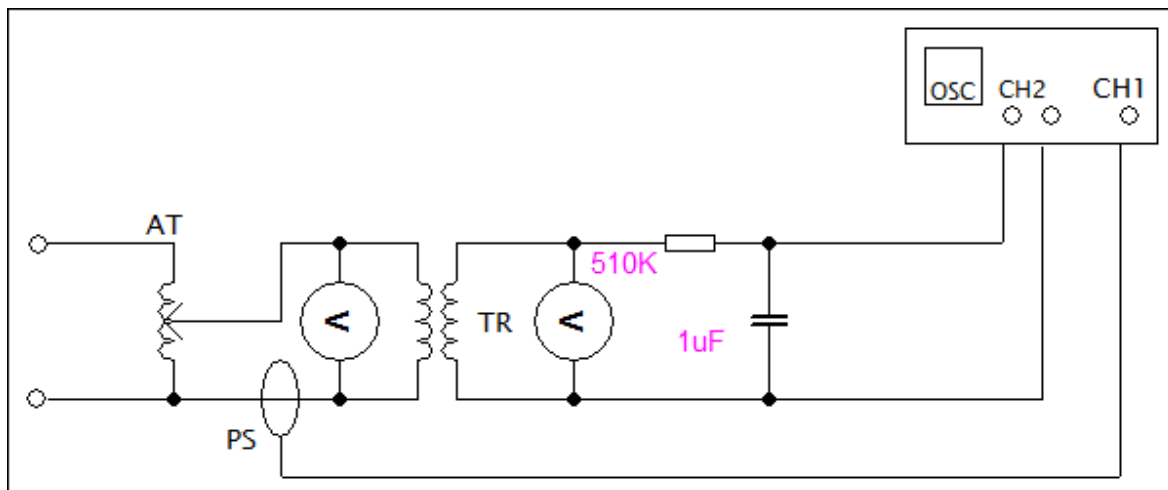
Obrázek 8 - Změna polohy domén při změně intenzity magnetického pole [2]

3.1.4 Měření dynamické hysterezní smyčky

Pro vyhodnocení kvality magnetického obvodu a hysterezních ztrát se měří hysterezní smyčka transformátoru.

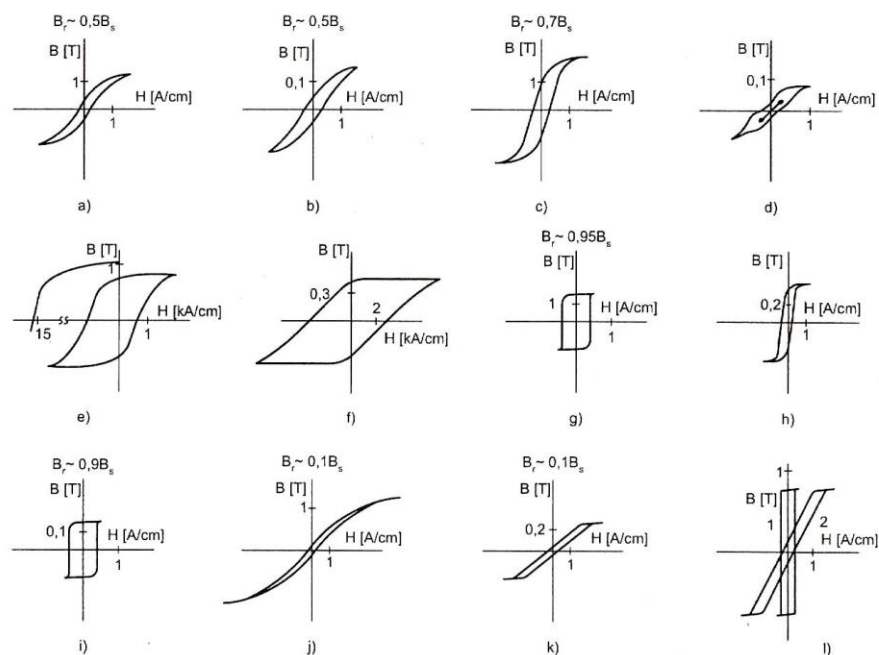
Ztráty naprázdno se dělí na ztráty v železe a ztráty Joulovy. Joulovy ztráty jsou však oproti ztrátám v železe zanedbatelné, celkové ztráty naprázdno jsou tedy rovny ztrátám v železe. Tyto ztráty se především určují z hmotnosti magnetického obvodu a z charakteristik plechů, kterou dodává výrobce. Druhým způsobem jak určit tyto ztráty, je změření hysterezní smyčky použitých transformátorových plechů. Měření samotné hysterezní smyčky však o ztrátách nic neřekne. Aby se ztráty určili, musí se spočítat plocha hysterezní smyčky.

Jedna z metod měření hysterezní smyčky je metoda osciloskopická. Tato metoda umožňuje měření elektrických veličin, konkrétně napětí a proudu. Proud je úměrný intenzitě magnetického pole a napětí je úměrné magnetické indukci. Na horizontální vstup osciloskopu jsou připojené proudové kleště, které měří proud primárním vinutím transformátoru. Napětí úměrné magnetické indukci je přivedeno na vertikální vstup Y. Pro zobrazení signálu, který je úměrný magnetické indukci, se musí na výstupní stranu transformátoru připojit integrační článek, který provede integraci výstupního napětí. Pomocí RC článku se poté dostane průběh magnetické indukce. Aby RC článek plnil správně svou funkci, musí platit $R \gg \frac{1}{\omega C}$. Po zapojení obvodu dle schématu se pomocí autotransformátoru najede na hodnotu jmenovitého napětí. Aby došlo k vykreslení, musí se osciloskop přepnout z režimu X-t na režim X-Y.



Obrázek 9 - Schéma zapojení hysterezní smyčky

Po menších úpravách, jako je posunutí, aby byla smyčka souměrná podle počátku, zvětšení velikosti hysterezní smyčky, se smyčka na osciloskopu vykreslí. Tvary hysterezních smyček mohou být různé, jsou dány vlastností materiálu. Pro tvrdé ferity jsou typické smyčky s větší plochou a velkou koercitivní intenzitou. Naopak měkké materiály se vyznačují užší plochou a tím pádem mají menší ztráty. Tyto měkké ferity jsou proto vhodnou volbou pro transformátor, z důvodu malých hysterezních ztrát. [2].



Hysterezní smyčky některých magnetických látek. (Tvar hysterezních smyček uváděný v katalogích výrobců není neproměnný. U některých materiálů je velmi ovlivnitelný skládáním plechů do jádra, jeho stahováním a ovijemím vodičem, přenášejí-li se na jádro tahová nebo tlaková napětí. Neproměnnou oblastí je indukce nasycení.)

- magneticky měkký kovový materiál. Normální tvar hysterezní smyčky.*
- magneticky měkký ferit.*
- elektrotechnická ocel anizotropní (textura GOSS).*
- permivarová hysterezní smyčka feritu.*
- magneticky tvrdý kovový materiál. Je zakreslen druhý kvadrant hysterezní smyčky magnetu se vzácnými zeminami.*
- magneticky tvrdý ferit.*
- pravoúhlá hysterezní smyčka kovového materiálu.*
- magneticky měkký ferit s vysokou indukcí nasycení.*
- pravoúhlá hysterezní smyčka feritu paměťového typu.*
- izopermová hysterezní smyčka kovového materiálu, železoprachová jádra.*
- izopermová hysterezní smyčka feritu.*
- hysterezní smyčka amorfního kovového magnetického materiálu systému Co.*
 - s orientovanou magnetickou texturou*
 - s neorientovanou magnetickou texturou*

Obrázek 10 - Hysterezní smyčky některých magnetických látek[2]

Po vykreslení smyčky se proměří horní polovina smyčky a zapíše se hodnoty obou kanálů z osciloskopu. Poté se musí jednotlivé veličiny sond přepočítat na hodnotu magnetické indukce a intenzity magnetického pole. Přepočet signálů se provádí pomocí konstant, které se spočítají následovně:

Výpočet intenzity magnetického pole se spočítá pomocí první Maxwellovi rovnice:

$$\oint H dl = I_c \quad (24)$$

Dostaneme tedy:

$$H = \frac{N_1 * I_1}{l_s} \quad (25)$$

kde:

Hintenzita magnetického pole (A/m)

I_1proud tekoucí primárním vinutím (A)

l_sstřední délka siločáry (m)

N_1počet závitů na primární straně (-)

N_2počet závitů na sekundární straně (-)

Pro výpočet indukce magnetického pole se musí spočítat přepočtová konstanta C_b . K výpočtu konstanty slouží vzorec pro výpočet maximální hodnoty napětí na výstupní straně transformátoru:

$$U_2 = 4,44 * B_{max} * S_{FE} * N_2 * f \quad (26)$$

Z tohoto vzorce se vyjádří hodnota maximální indukce B_{max} , která se poté dosadí do vzorce pro přepočtovou konstantu:

$$B_{max} = \frac{U_2}{4,44 * S_{FE} * N_2 * f} \quad (27)$$

$$C_B = \frac{B_{max}}{U_{CH2}} \quad (28)$$

Po vypočtení konstanty se následně spočítá magnetická indukce:

$$B = C_B * U_{CH2} \quad (29)$$

kde:

B_{max}maximální hodnota mag. indukce při určitém napětí U_2 (T)

U_{CH2}efektivní hodnota napětí za integračním článkem (V)

N_2počet závitů na sekundární transformátoru (-)

S_{FE}průřez jádra (m^2)

ffrekvence (Hz)

U_2efektivní hodnota napětí na sekundární straně změřen voltmetrem (V)

C_Bpřepočtová konstanta mezi napětím na RC článku a magnetickou indukcí (T)

3.1.5 Výpočet hysterezních ztrát

Správnost měření hysterezní smyčky lze potvrdit výpočtem, kde jako výsledek dostaneme ztrátové číslo transformátorových plechů, tedy měrné ztráty $P_{B/f}$ (W/kg), tyto ztráty se poté vynásobím samotnou hmotností magnetického obvodu a dostane se výsledek celkových hysterezních ztrát. Hysterezní ztráty jsou úměrné obsahu hysterezní smyčky. Jelikož je tvar hysterezní smyčky nepravidelný (tvar není definován funkcí, přes kterou lze integrovat), tak je počítání pomocí integrálu složité. Z dostupných zdrojů jsem se dozvěděl, že plochu lze spočítat přes softwarový program Matlab a nebo lze plochu spočítat lichoběžníkovou metodou. Já zvolil druhou metodu, tedy počítání obsahu pomocí lichoběžníkové metody.

Tato metoda umožňuje spočítat obsah funkce, i když neznáme její předpis. K výpočtu nám stačí pouze tabulka hodnot dané funkce. Výpočet spočívá v rozdělení funkce na různé podintervaly n , v těchto intervalech je provedena aproximace lineární funkcí. Nakonec se spočítá určitý integrál těchto lineárních funkcí, pomocí toho, že využijeme výpočtu plochy lichoběžníku. Odhad určitého integrálu je poté dán tímto vztahem: [8]

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{n} \left(\frac{f(x_0)}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + \frac{f(x_n)}{2} \right) \quad (30)$$

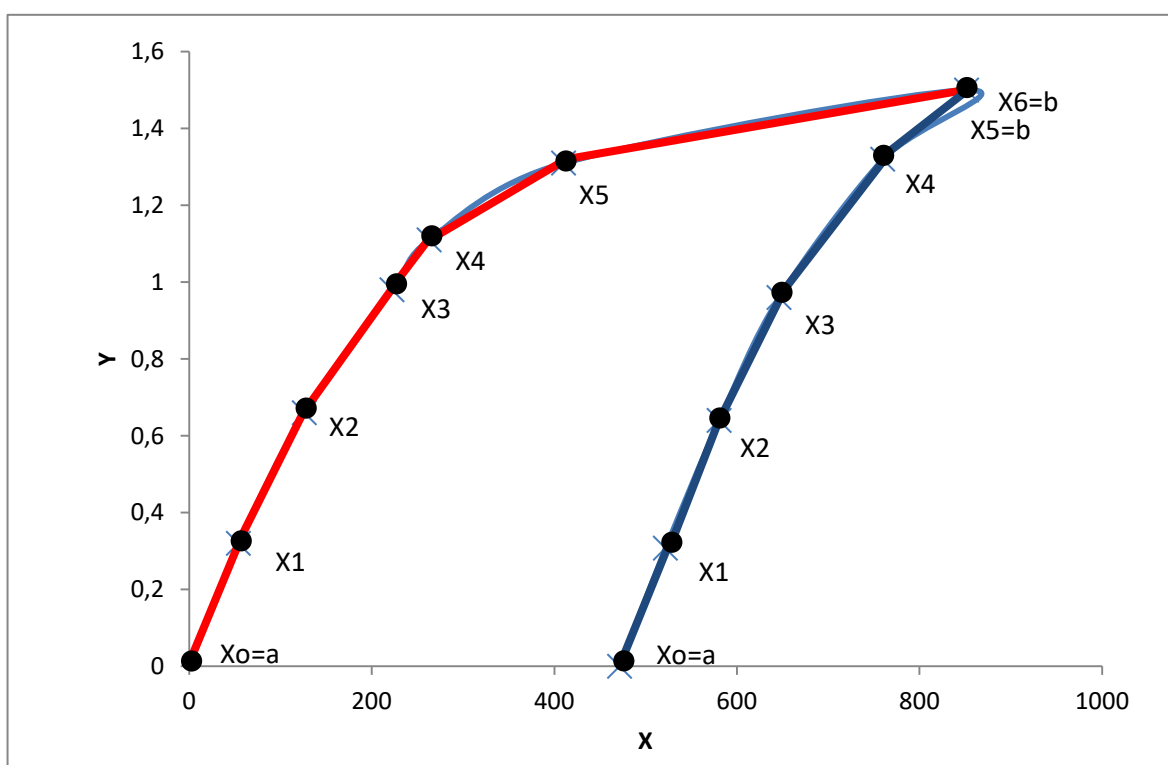
kde

a, bkrajní hodnoty intervalu

npočet podintervalů

$f(x)$ funkční hodnota v daném bodě

Pro výpočet je zvolena horní polovina hysterezní smyčky, a rozdělena na dvě části. Nejdříve se spočítá obsah horní větve (červená barva) hysterezní smyčky a od něho je odečten obsah pod dolní větví (modrá barva), aby se dostal výsledek jen samotné plochy. Jelikož vyšel obsah jen horní poloviny smyčky, tak se v závěru obsah vynásobí dvěma.



Obrázek 11 - Rozdělení smyčky na jednotlivé intervaly

Ztrátové číslo transformátoru se tedy dostane takto:

- 1) Výpočet plochy pod červenou funkcí a modrou funkcí se provede zvlášť pomocí tohoto vzorce:

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{n} \left(\frac{f(x_0)}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + \frac{f(x_n)}{2} \right) \quad (31)$$

Celková plocha hysterezní smyčky se dostane odečtením dvou ploch a vynásobí se dvěma, jelikož se spočítala pouze horní polovina smyčky:

$$S_h = (S_1 - S_2) * 2 \quad (32)$$

Ztrátové číslo transformátorového plechu při pracování indukcí a frekvencí se vypočítá pomocí hustoty materiálu následovně:

$$P_{B/f} = \frac{P_j}{V * \rho} = \frac{S_h * f}{\rho} \quad (33)$$

Kde:

ρhustota materiálu plechů (ocel), $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$

P_jcelkové ztráty jádra (W)

Vobjem jádra m^3

f Frekvence (Hz)

S_hplocha hysterezní smyčky ($\frac{J}{m^3}$)

Ze ztrátového čísla se zjistí celkové hysterezní ztráty, vynásobením vahou celého magnetického obvodu:

$$P_h = P_{B/f} * m \quad (34)$$

3.2 Vinutí

Pro malé (síťové), transformátory jsou vinutí zhotovena z lakovaných drátů různých průměrů. Cívka se navíjí, ať už ručně, nebo pomocí stroje na cívkové tělísko, které je zhotoveno z lesklé lepenky. Cívky se navíjí závit po závitě a mezi jednotlivé vrstvy tvořené závity se vkládá impregnovaný papír. Pokud je vodič větší než 1 mm, pak se

používají lepenky, které mají tloušťku 10 až 15 % průměru vodiče.

Jak je již zmíněno, cívky se navíjejí na cívkové tělísko, kterým je válec z tvrzeného papíru. Podle uspořádání jednotlivých cívek na válci rozlišujeme vinutí sousé a prostřídané. U sousého vinutí jsou cívky nižšího a vyššího napětí namotány přímo na sobě, soustředně jedna uvnitř druhé, a cívky jsou vzájemně izolovány. Mezi strany vyššího a nižšího napětí je vložena izolace. Izolace se zhotovuje tak, že se na stranu nižšího napětí uloží lišty, které jsou rovnoběžné s osou cívky, a na lišty se nasadí válec z tvrzeného papíru. Poté se na válec nasadí další lišty a až po nasazení druhé lišty se znovu na válec navine vinutí, tentokrát strany vysokého napětí. Blíže k magnetickému obvodu bývá vinutí pro stranu nižšího napětí. Druhým typem vinutí je vinutí prostřídané. Na rozdíl od vinutí sousého nejsou cívky vysokého nízkého napětí na sobě, ale jsou uloženy střídavě na jádře. Abychom dosáhli magnetické souměrnosti, tak se na začátek a konec jádra umísťují cívky s nižším napětím a polovičními závity. [9]

Vinutí musí být dimenzována tak, aby vydržela vliv dynamických sil při zkratech. Pro vinutí se také musí zvolit vhodná izolace, která udává horní teplotní hranici, kterou musí transformátor vydržet. Izolační materiál je rozdělen do několika tříd, které se označují písmeny.[9]

Tabulka 1 - Teplotní třídy izolace transformátorů

Třída	Teplota (°C)
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
G	nad 180

Chlazení transformátorů se aplikuje z důvodu odvodu tepla, které na transformátoru vzniká průchodem elektrického proudu ve vinutí, vzniká také vlivem vířivých proudů v magnetickém obvodu, které způsobují ztráty naprázdno. Transformátor se také zahřívá vlivem nepříznivých klimatických podmínek. Chlazení se aplikuje zejména na distribuční výkonové transformátory, kde se projevují vlivem tepla velké ztráty. Tyto ztráty mají za následek vzniklé teplo, které je potřeba odvádět, protože pro správnou funkci

transformátoru jsou dány normou ČSN EN 60076 tři pravidla, které je nutné dodržet. Prvním pravidlem je průměrná roční teplota 20 °C, pravidlem druhým je maximální denní průměrná teplota 30 °C a posledním je maximální špičková teplota, která činí 40 °C. K chlazení transformátoru se nejčastěji používá vzduch, olej a křemičitý písek.[1]

Vzduchové transformátory jsou, jak již název napovídá, chlazení prouděním vzduchu. Chlazení transformátoru může být přirozené či nucené. U přirozeného chlazení je transformátor namontován na profilovou ocel a je chlazen přirozeným prouděním okolního vzduchu. Některé transformátory sloužící pro distribuci jsou však umístěné ve skříně a není zde možnost přirozené cirkulace vzduchu. Tento problém je řešen otvory v horní části skříně pro odvod vzduchu, který se do skříně vhání ventilátorovou jednotkou, která zajišťuje plynulou cirkulaci vzduchu. Vzduchové transformátory jsou transformátory menších výkonů.

Pro transformátory větších výkonů se používá jako chlazení olej. U olejových transformátorů olej chladí, ale také izoluje a mechanicky chrání. Teplo, které při provozu transformátoru vzniká, je odváděno do olejové nádoby a poté je odváděno do okolí. Nádoby na olej jsou hladké, ale také se provádí se žebry, pomocí kterých se zvětší plocha vyzařování tepla. Olej cirkuluje přirozeně nebo nuceně.

4 Analýzy vlivu provedení svaru plechu jádra transformátoru

Základním předpokladem pro analýzu je ten, že transformátor je ve stavu naprázdno, nezatížený. Sekundární svorky jsou rozpojeny, obvodem protéká pouze proud naprázdno a ten protéká pouze primárním vinutím. Tento proud, nazývaný také magnetizační vyvolává indukční tok, který prochází magnetickým obvodem. Magnetovací proud cívky s jádrem se může odlišovat od průběhu proudů I_1 a I_2 , které protékají vstupním a výstupním vinutím při zatížení výstupního vinutí. I když je transformátor nezatížený, i tento poměrně malý proud vytváří ztráty, které je nutné co nejvíce snížit. Výrobci udávají v katalogích minimální a maximální hodnoty proudu jak jmenovitého, tak i proudu naprázdno. Při testování vyrobeného transformátoru se tento proud měří a při překročení limitních hodnot proudu se transformátor nemůže z výroby poslat dále. [2]

Z předchozího popisu transformátoru stavu naprázdno lze říct, že tyto ztráty jsou závislé na kvalitě magnetického obvodu, to znamená na materiálu jádra, na jeho tvaru a na složení plechu. S jistotou tedy lze říci, že i samotný svar plechů bude magnetizační proud ovlivňovat. Obecně se ztrátám předchází volbou vhodného materiálu transformátorových plechů, které jsou vzájemně izolované. Plechy jsou za tepla válcované a dovolují hodnoty maximální indukce až 1,8 T. Čím vyšší hodnoty magnetické indukce, tím se umožňuje zmenšit celkový průřez jádra a tím i váhu transformátoru a to je ekonomicky výhodnější.

Problémem, kterým se budu v další části bakalářské práce zabývat, je svar těchto transformátorových plechu a jeho vlivy na magnetický obvod. Transformátory mají různé typy jader, jak je již zmíněno v teoretické části. Zbytek bakalářské práce bude zaměřena na jednofázové transformátory, které mají jádra typu EI. Toto jádro je složené ze dvou částí a pomocí roztavení obou částí elektrickým obloukem se jednotlivé části spojí. Svar způsobí deformaci transformátorových plechů a jistě ovlivní průběh magnetizačního proudu a ztráty hysterezní.

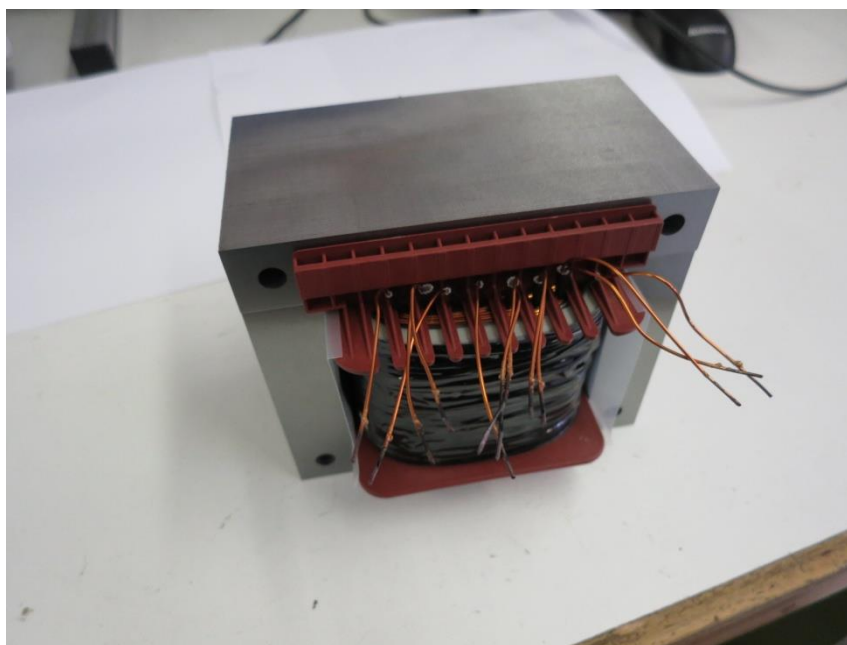
4.1 Měření a svařování

Samotný proces svařování a následné měření jednofázových transformátorů probíhalo v laboratoři. Vliv svaru jsem testoval na jednom z transformátoru, který jsem měl aktuálně k dispozici. Takovýto transformátor se nejdříve v oddělení konstrukce navrhne podle žádané zakázky s ohledem na funkční a ekonomické požadavky a poté se zakázka pošle do výroby, kde se transformátor již pod svým sériovým číslem začne zhotovovat. Proces výroby je přibližně u každého transformátoru stejný. Nejdříve se na navíjecích automatech podle navíjecího manuálu navine lakované vinutí na cívkové tělísko, poté se cívky osadí transformátorovými plechy. Aby plechy byly pospolu a transformátor držel jako celek, tak se transformátorové plechy svaří. Poté se transformátor osadí vývody vinutí a provádí se samotná kontrola měřením základních charakteristik.

4.2 Testovaný transformátor

Pro analýzu a samotné testování a měření jsem si vybral konkrétně jeden transformátor z výrobní linky. Transformátor má primární a sekundární vinutí na jednom sloupku, jedná se tedy o transformátor plášťový. Jak bylo již zmíněno, magnetické plechy transformátoru jsou typu EI 135. Plechy mají označení M530-50A. Písmeno M značí, že se jedná o

transformátorové plechy. Číslo 530 označuje wattové ztráty transformátorového plechu na kilogram. V tomto případě wattové ztráty tohoto konkrétního plechu jsou 5,3 W/Kg. Číslo 50 určuje tloušťku jednoho plíšku, která činí 0,5 mm. Plechy jsou válcované za studena, jsou levnější, lépe zpracovatelné, ale mají větší ztráty. Veškeré další informace o tomto produktu lze nalézt v příloze.



Obrázek 12- Testovaný nesvařený transformátor

4.3 Svařování

Po osazení cívkových tělísek na transformátorové plechy, se transformátor přesune ke svářecímu automatu, kde se provede svar transformátoru. Svar se provádí na obou stranách, kde k sobě dosedají konce části plechů EI. Transformátor se nejdříve připevní do svěraku, aby transformátor pevně držel při svařování a svar byl rovný po celé délce svařovaného magnetického obvodu.

Svařování všeobecně je proces, kdy se trvale a nerozebíratelně spojí dvě nebo více částí. Lze svařovat jak kovové, tak i nekovové části materiálů o různých vlastnostech. Jelikož jsou požadavky na všemožné typy spojů materiálů o různých vlastnostech, existují také různé metody svařování.

Mezi nejzákladnější metody svařování patří svařování pod tlakem, takzvané tlakové svařování, poté tavné svařování a tlakové svařování za studena. Nejčastěji se používá svařování tavné, kde je energie na místo, kde chceme svár realizovat přiváděna ve formě tepla. Ke spojení materiálů tedy dochází tedy při jejich roztavení. Mezi klasické metody tavného svařování patří svařování elektrickým obloukem. U tlakového svařování dochází ke spojení materiálu vlivem tlaku a zároveň tepla. Ke svaření dojde vlivem difúze, kde se na dosedajících vzájemných plochách vytvoří vazby mezi hraničními mřížkami. Poslední metodou je svařování tlakové za studena. Je to podobná metoda jako u svařování tlakového, akorát je zde absence tepla.[6]

4.3.1 Svářecí automat

Testovaný transformátor jsem svařoval pomocí svářecího automatu. Tento stroj využívá *svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře interního plynu* a řadí se mezi metody tavného svařování. Tato metoda se využívá především ke svařování ocelí nebo titanu, dále hliníku. Při svařovacím procesu se používají wolframové elektrody, které díky stejnosměrnému proudu vytvoří hořící oblouk, který následně nataví svařovaný materiál a dojde k trvalému spojení materiálů. Wolframové elektrody se vyrábí spékáním čistého wolframu, nebo se přidávají oxidy. Důležité je elektrody průběžně kontrolovat, jelikož se při svařování mohou nežádoucím způsobem ponořit do svařované lázně a může dojít k otupení hrotu elektrody a kontaminaci hrotu nežádoucími prvky, tím pádem by poté nebyl tak kvalitní. Z tohoto důvodu se elektroda pravidelně zabrušuje na brusném kotouči.

Svařovací automat využívá technologii svařování stejnosměrným proudem. Výhodou svařování stejnosměrným proudem je, že dochází k velkému průvaru a elektroda není tepelně namáhána. Další velkou výhodou této metody je možnost svařování široké škály materiálů. Svařovací metoda využívá interních plynů, nejčastěji helium nebo argonu nebo jejich směsi. Ochranná atmosféra se používá z důvodu omezení přístupu nežádoucích plynů, které by mohli narušit daný svár. Plyny by mohly na svaru způsobit bubliny, póry a svár by mohl být křehčí. V mém případě, svařovací automat využíval argon s vodíkem v poměru 9:1.



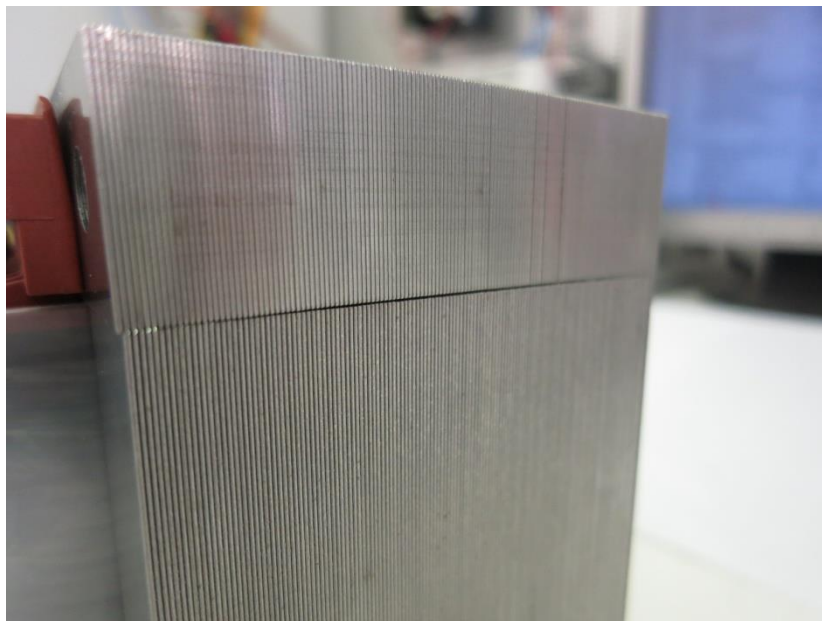
Obrázek 13 - Svařovací automat

4.3.2 Průběh svařování

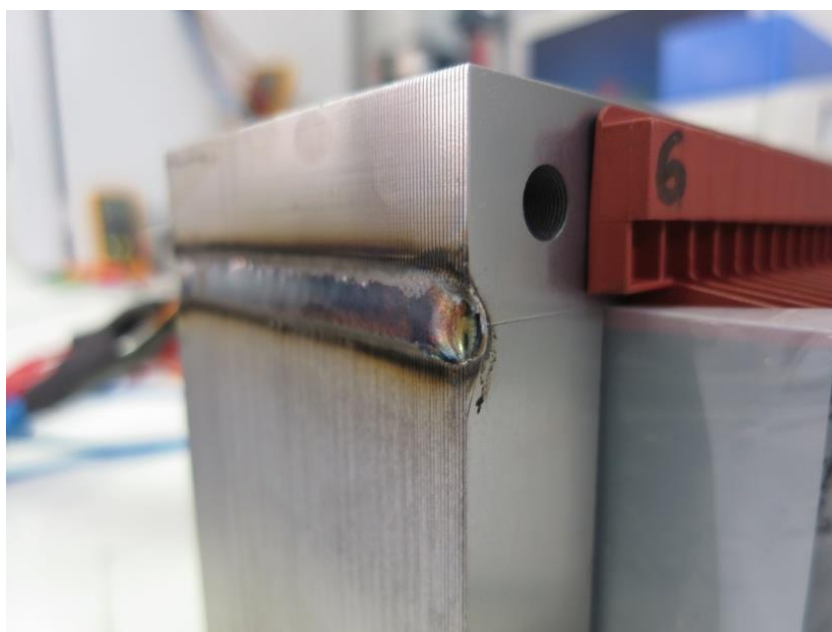
Pro svařování jsem měl k dispozici celkem šest stejných vzorků jednoho prototypu transformátoru. Transformátor byl osazen, jak už bylo zmíněno plechy EI 135 M530-50A, které se poslali ke svařovacímu automatu na svaření. Na svařovacím automatu se vždy nastavují hodnoty posuvu wolframových elektrod v mm/sec a hodnoty svařovacího proudu na svářečkách. Tyto hodnoty jsou předem dány a volí se vždy s ohledem na velikost magnetického obvodu, to zazené na typ plechu. Posuvy elektrod jsou celkem dva, horní a spodní posuv. Rychlost horní posuvu elektrod se volí obecně větší než spodní, to je dáno tabulkovou hodnotou. Svářečí automat nejdříve svaří horní spojení plechů, kde dojde ke spojení částí E a I. Zde je také umístěn zemnicí kontakt pro zemnicí vodič, který se také přivaří k magnetickému obvodu. Po svaření částí plechů E a I svařovací automat sjede do nižší polohy, kde se přivaří patka k plechům. Patka slouží pro upevnění transformátoru do pracovní pozice.

V první části svařování se nastavili hodnoty parametrů, které jsou předepsány ve svářečím automatu pro daný typ plechu. Velikost svařovacího proudu byla na svářečce nastavena na hodnotu 145 ampér, jak pro levou, tak i pro pravou elektrodu (hodnoty proudů budu dále uvádět jednotně, jelikož jsou na obou elektrodách stejné). Svařovací jehly svařovaly horní spojení plechu E a I rychlostí 6 mm/sec a rychlostí 7 mm/sec svařovali patku transformátoru. Tímto nastavením bylo svařeno všech šest transformátoru

a poté na každém kusu bylo prováděno měření proudu, které je popsáno v další kapitole.

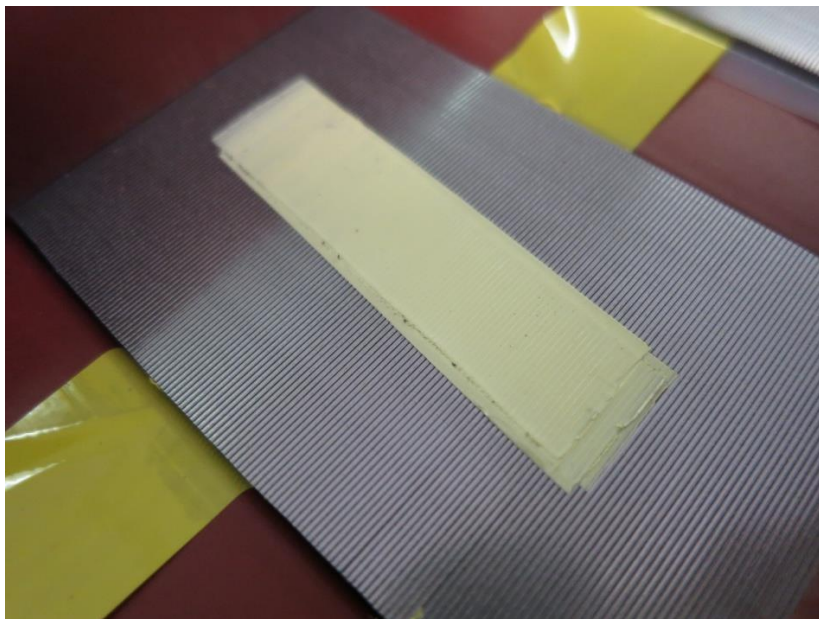


Obrázek 14 - Seskládané plechy EI 135, M530-50A bez provedeného svaru



Obrázek 15 - Svařené transformátorové plechy proudem 145 ampér

Po změření proudu se svařené plechy z cívkových tělísek odstranily a osadili plechy novými. Mezi plechy byla umístěna lepenková páska, která byla lepena na stykové plochy transformátoru po různých vrstvách. Použitá lepenka reprezentovala vzduchovou mezeru transformátoru z důvodu vlivu vzduchové mezery na proud naprázdno. Na svařovacím automatu se plechy znovu svařily stejnými parametry jako v předešlé části.



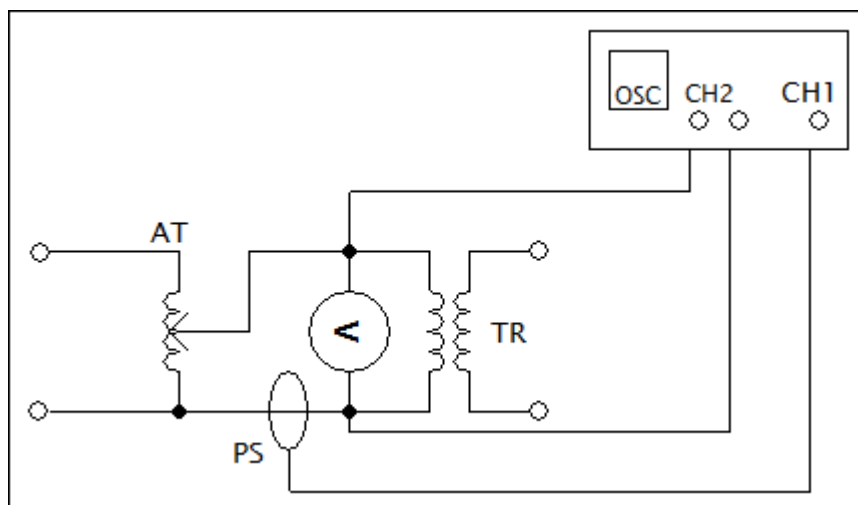
Obrázek 16 - Lepící páska nalepená na plíškách reprezentující vzduchovou mezeru

V závěrečné části jsem nastavoval s obsluhou svařovacího automatu svařovací parametry tak, abychom zjistili vliv samotného svaru na proud naprázdno. Naposledy znovu osazené vzorky novými plechy byly kus po kusu svařovány, ale nyní jsme nastavovali krajní hodnoty jak posuvů, tak svařovacích proudů, aby jsem se dozvěděl, jaký vliv má svar na proud naprázdno. První dva transformátory se svařovaly za stejné rychlosti, ale hodnoty svařovacích proudů se lišily. První byl svařován 120 ampérovým proudem, druhý 140 ampérovým proudem. Vzorkům tři a čtyři byla nastavena stejná hodnota svařovacího proudu (145 A), ale posuvy se lišily. Na závěr jsme na svařovacím automatu nastavili hodnoty posuvu a proudů, které dle našich predikcí vyvolá největší proud naprázdno. Hodnoty všech proudů při různých nastaveních svářecího automatu jsou uvedeny v další kapitole.

4.4 Měření naprázdno

Měření naprázdno bylo prováděno pod jmenovitým napětím, v našem případě 230 V. Hodnotu napětí jsem nastavil na regulačním autotransformátoru. Výstupní svorky byly rozpojeny, není připojena zátěž a proud $I_2 = 0$. Napětí U_1 bylo měřeno pomocí digitálního voltmetru FLUKE a proud byl snímán proudovými kleštěmi FLUKE i400s připojenou k digitálnímu osciloskopu Agilent DSO-X 3024A. Sonda napěťová byla připojena na vstupní svorky transformátoru a měla vysokoimpedanční odporový dělič v poměru 100:1. Po zapojení obvodu jsem následně odečítal z osciloskopu hodnotu celkového proudu

naprázdno I_0 .



Obrázek 17 - Měření naprázdno, schéma zapojení transformátoru

V první části měření se nejdříve změřil proud naprázdno šesti vzorků transformátoru bez svaru, aby se zjistilo, jak moc se liší proud naprázdno od svařeného transformátoru oproti transformátoru nesvařeného. Následně jsem změřil všechny transformátory, které byly svařeny různými posuvy a různými proudy. Zapojení bylo pro všechny vzorky stejné a neměnné. Všechny naměřené veličiny jsem zaznamenal a jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tabulka 2 - Měření bez sváru a vzduchové mezery

Měření bez sváru a vzduchové mezery		
Vzorek	U (V)	I (mA)
1	230	320
2	230	383
3	230	357
4	230	336
5	230	340
6	230	308
Průměr	230	340,7

Tabulka 3 - Transformátor s předepsanými svařovacími hodnotami a s realizovanou vzduchovou mezerou

Se svarem			Svařovací proud elektrod I (A)	Posuv elektrod (mm/sec)		Šířka vzduchové mezery mezi patkami E/I (mm)
Vzorek	U (V)	I (mA)		Spodní svár	Horní svár	
1	230	534	145	7	6	0,06
2	230	590				0,12
3	230	690				0,18
4	230	935				0,24
5	230	437				Bez mezery
6	230	449				Bez mezery

Tabulka 4 - Transformátor svařovaný stejnou rychlostí, různými proudy

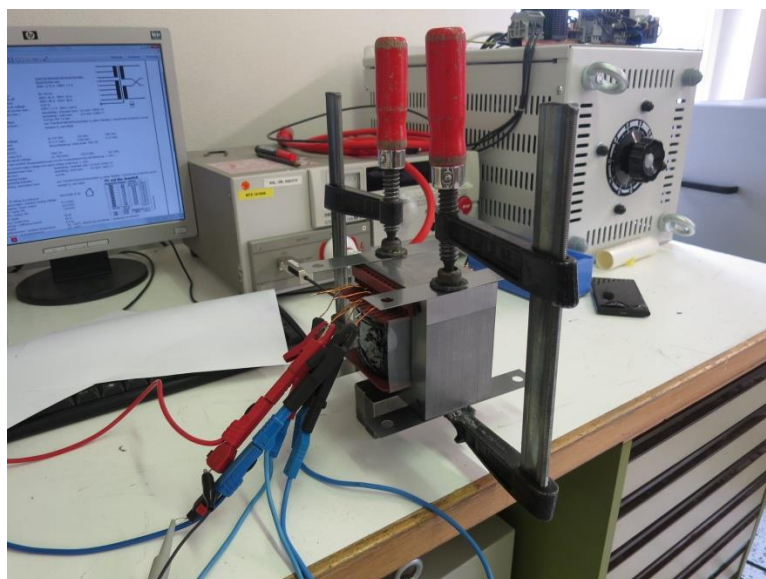
Se svarem - stejná svařovací rychlost, různé proudy			Svařovací proud elektrod I (A)	Posuv elektrod (mm/sec)	
Vzorek	U (V)	I (mA)		Spodní svár	Horní svár
1	230	400	120	7	6
2	230	444	160	7	6

Tabulka 5 - Transformátor svařovaný různými rychlostmi, stejnými proudy

Se svarem - různá svařovací rychlost, shodné proudy			Svařovací proud elektrod I (A)	Posuv elektrod (mm/sec)	
Vzorek	U (V)	I (mA)		Spodní svár	Horní svár
3	230	453	145	5	4
4	230	374	145	11	10

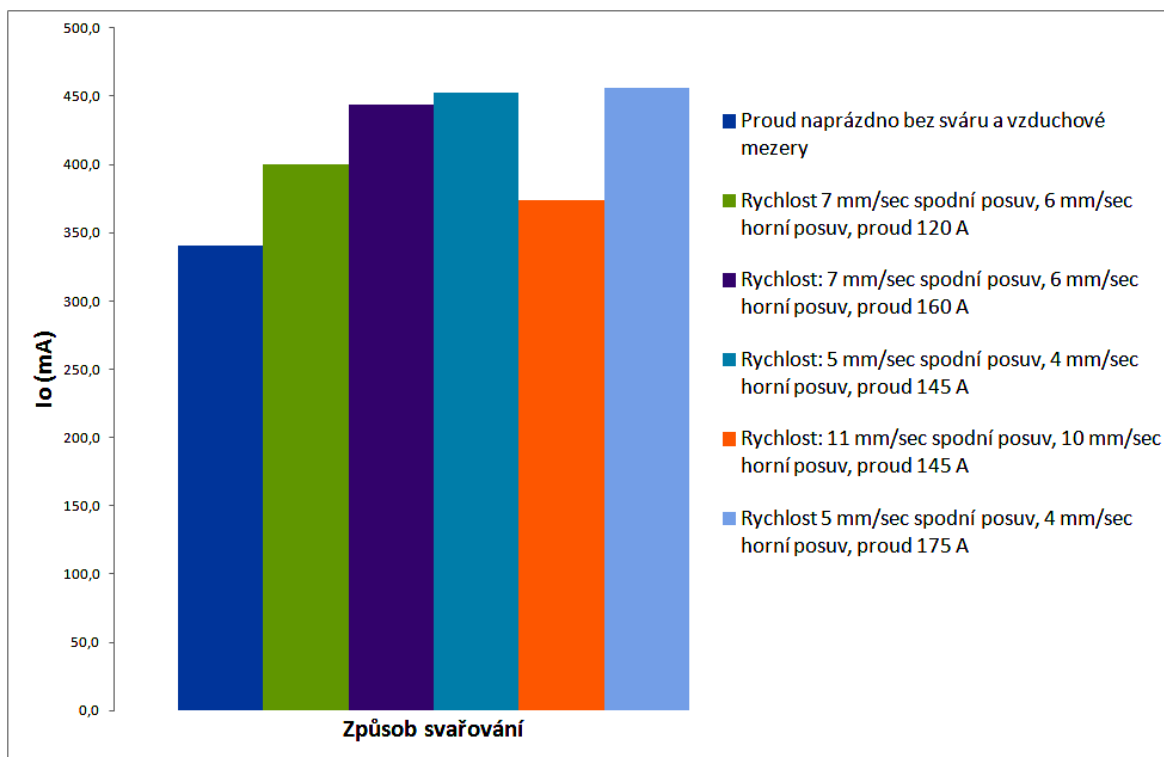
Tabulka 6 - Transformátor svařovaný velkým svařovacím proudem a nízkou svařovací rychlostí

Se svarem - pomalá svařovací rychlost, velký proud			Svařovací proud elektrod I (A)	Posuv elektrod (mm/sec)	
Vzorek	U (V)	I (mA)		Spodní svár	Horní svár
1	230	456	175	5	4

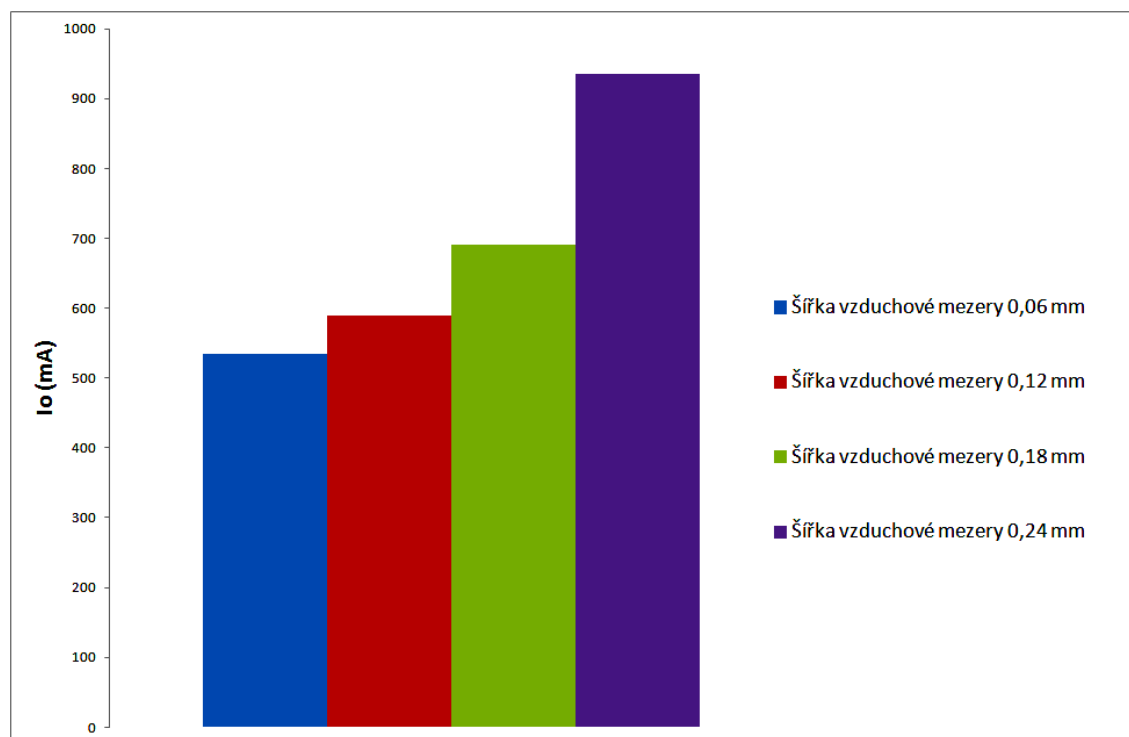


Obrázek 18 - Měření proudu naprázdno bez provedeného svaru

Pro představu jak se proudy naprázdno mění v závislosti na svařovacích proudech, posuvech a realizované vzduchové mezery se výsledky znázornili graficky.



Obrázek 19 - Závislost změny proudu při různě nastavených parametrech svařování



Obrázek 20 - Závislost změny proudu naprázdno na zvětšující se vzduchové mezeře

4.4.1 Výpočet proudu naprázdno

Proud naprázdno jsem počítal pro transformátor, jehož obvod je bez vzduchové mezery a je nesvařený. Vycházel jsem z náhradního magnetického obvodu, který je analogický k obvodu elektrickému, jenže se zde pracuje s jinými (magnetickými) veličinami.

Magnetickým obvodem místo proudu teče magnetický (indukční) tok. Důležitým aspektem je, že se tento tok neuzavírá mimo magnetický obvod feromagnetika, to znamená, že zanedbáváme rozptyl. Všechny indukční tok se uzavírá v jádru. Pro sestavení ekvivalentního obvodu, je třeba znát veličiny popisující magnetický obvod. V magnetickém obvodu hraje velkou roli veličina magnetomotorické napětí, které je analogií k napěťovému zdroji a vypočítá se takto:

$$F_m = NI = Hl \quad (35)$$

Další veličinou je magnetický odpor, který je dán podílem celkové délky střední indukční čáry dělenou plochou magnetického obvodu násobenou permeabilitou a činitelem plnění.

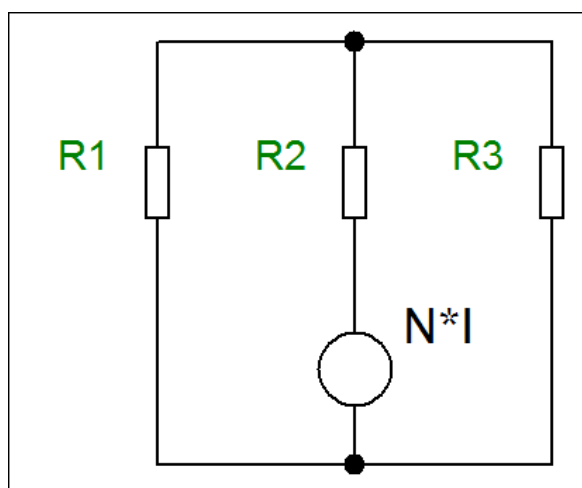
$$R_m = \frac{l}{\mu * S * k_p} (H^{-1}) \quad (36)$$

Výsledná rovnice, která využívá tyto veličiny, vyjadřuje Hopkinsonův zákon pro magnetický obvod a je to vlastně obdoba Ohmova zákona pro elektrický obvod:

$$F_m = R_m * \phi = N * I \quad (37)$$

Pro řešení magnetického obvodu jsem si zhotovil náčrtek transformátoru s vyznačenými rozměry pro výpočet průřezu jádra. V náčrsku je vyznačena délka střední indukční čáry, která je rozdělena na tři úseky o stejném průřezu. Na prostředním sloupku je primární vinutí. Vinutí sekundární strany nepočítám, jelikož při stavu naprázdno jím neteče žádný proud.

Z náčrsku můžeme odvodit náhradní magnetický obvod, který vypadá takto:



Obrázek 21 - Náčrtek magnetického obvodu

Vstupní veličiny potřebné pro výpočet transformátoru jsou tyto. Zvolená hodnota magnetické indukce je 1,2 T, je to pracovní indukce, která se určí pro sestavení magnetického obvodu. Z této hodnoty magnetické indukce jsem pomocí grafu z katalogu od firmy Waasner (Příloha2) určil intenzitu magnetického pole, která vyšla 270 A/m. Po ohlednutí do grafu závislosti permeability na intenzitě (Příloha3), jsem určil permeabilitu

materiálu, která mi vyšla po odečtení 3600 H/m. Průřezy jader jednotlivých sloupků jsem určil z katalogu daného plechu (Příloha 1). Magnetické odpory označené indexy jedna a tři jsou odpory krajních sloupku

Výpočet magnetických odporů:

$$R_{m1} = \frac{1}{\mu_0 * \mu_R} * \frac{l_1}{S_1 * k_p} = \frac{1}{4 * \pi * 10^{-7} * 3600} * \frac{0,2025}{0,00163 * 0,9} = 30701,18 H^{-1}$$

$$R_{m2} = \frac{1}{\mu_0 * \mu_R} * \frac{l_2}{S_2 * k_p} = \frac{1}{4 * \pi * 10^{-7} * 3600} * \frac{0,09}{0,00324 * 0,9} = 6822,5 H^{-1}$$

$$R_{m3} = \frac{1}{\mu_0 * \mu_R} * \frac{l_3}{S_3 * k_p} = \frac{1}{4 * \pi * 10^{-7} * 3600} * \frac{0,2025}{0,00163 * 0,9} = 30701,18 H^{-1}$$

Celkový magnetický odpor spočtený paralelní kombinací R_{z1} a R_{z3} a poté do série spojený R_{z2} .

$$R_m = \frac{R_{m1} * R_{m3}}{R_{m1} + R_{m3}} + R_{m2} = \frac{30701,18 * 30701,18}{30701,18 + 30701,18} + 6822,5 = 22173 H^{-1}$$

Indukční tok v krajních sloupcích transformátoru:

$$\Phi_{1,3} = B * S_{1,3} = 1,2 * 0,00163 = 1,94 mWb$$

Výsledný indukční tok jako součet toků krajními větvemi:

$$\Phi_C = \Phi_1 + \Phi_{1,3} = 1,94 + 1,94 = 3,88 mWb$$

Vyjádření proudu z Hopkinsonova zákona:

$$U_m = R_m * \Phi = N * I \quad (38)$$

$$I_o = \frac{R_m * \Phi_C}{N_1} = \frac{22173 * 3,88}{236} = 365,29 mA$$

Závěr

Bakalářská práce měla za úkol popsat vliv svaru plechu jádra transformátoru na velikosti proudu naprázdno, čili provést samotnou analýzu svaru. Měření ukázalo, že největší hodnoty proudu naprázdno měl prototyp, který byl svařen největším možným nastaveným svařovacím proudem 145 A. Zároveň rychlost posuvu svařovacích elektrod byla nastavena při tomto měření nejpomalejší. Posuvy elektrod byly u dolní patky transformátoru 5 mm/sec a u horní části, kde se spojují EI plechy 4 mm/sec. Naopak nejnižší hodnoty proudu naprázdno měl svařený transformátor, jehož hodnota svařovaného proudu sice činila stejnou hodnotu svařovacího proudu 145 A, ale posuvy svařovacích elektrod byly v tomto případě mnohem rychlejší: spodní posuv elektrod byl nastaven na rychlost 11 mm/sec a u horní části 10 mm/sec. Průběh měření také ukázal, že vzduchová mezera mezi plechy EI je opravdu nežádoucí a s větší vzdáleností plechů proud narůstá. Proto by se mezera měla co nejvíce omezit právě svarem, aby došlo ke spojení plechů, mezeru lze také zmenšit stažením magnetického obvodu.

Výsledek pro mne je ten, že na velikosti svařovacího proudu zas tolik nezáleží, ale na posuvu svařovacích elektrod ano. Při pomalejším svařování dojde k hlubšímu provaření plechů a k větší deformaci spojení EI plechů. Při vyšších intenzitách magnetického pole dochází k přesycování zeslabeného průřezu magnetického obvodu díky svaru a dochází k přesycování jádra a hysterezní smyčka se zvětšuje a to má vliv na hysterezní ztráty. Nejideálnějším případem by byl transformátor, který by nebyl svařen. Transformátorové plechy by musely být poskládány stejným směrem stříhu a dokonale dosedaly. Tento transformátor jsem i proměřil a hodnota proudu vyšla skutečně nejnižší (porovnání všech možných nastavení svarů a proudů naprázdno je znázorněno na Obr. 20 a na Obr. 19). Na tomto nevařeném transformátoru jsem provedl teoretický výpočet pro porovnání hodnot změřeného proudu s vypočteným. Proud naprázdno se liší jen nepatrně, a odchylka 7% se dala očekávat (velikost změřeného proudu naprázdno byla 365 mA a vypočteného proudu naprázdno byla 340 mA).

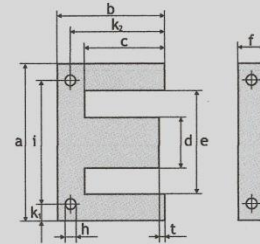
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VOŽENÍNEK, Václav. *Kurs elektrotechniky*. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [2] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a cívky*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-86056-49-X.
- [3] MYSLÍK, Jiří. *Elektromagnetické pole: základy teorie*. Praha: BEN - technická literatura, 1998. ISBN 80-86056-43-0.
- [4] BARTOŠ, V., ČERVENÝ, J., HRUŠKA, J., KOTLANOVÁ, A., SKALA, B. *Elektrické stroje*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-7043-444-9.
- [5] PETŘÍČEK, Ivo. *Transformator_E3A* [online]. Dostupné z: https://www.pslib.cz/ivo.petricek/skola/studijni_materialy/prezentace/elektricke_stroje/3_rocnik/
- [6] BLAHOVEC, Antonín. *Elektrotechnika I*. Praha: Informatorium, 2002. ISBN 80-7333-043-1.
- [7] MIKULA, HAVLÍČEK. *IMPEE_Zapocet4* [online]. Dostupné z: http://studentkmt.hostuju.cz/Materialy/LS_2/IMPEE/IMPEE_Zapocet4.pdf
- [8] KUČEROVÁ, Anna. *numint* [online]. nora 2012. Dostupné z: <http://mech.fsv.cvut.cz/~anicka/teaching/ypv1/priklady/numint.pdf>
- [9] ŠAVEL, Josef. *Elektrotechnologie: materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-154-3.
- [10] WAASNER. *KernblechteCoreLaminations* [online]. Dostupné z: http://www.waasner.de/fileadmin/Assets/PDFs/Waasner_Katalog.pdf
- [11] WAASNER. *Werkstoffkennlinien - Basismaterial* [online]. Dostupné z: http://www.waasner.de/fileadmin/Assets/PDFs/Werkstoffkennlinien_Basis_112011.pdf

Přílohy

Příloha 1 – Katalog velikostí plechů EI 135 [10]

EI-KERNBLECHE / CORE LAMINATIONS
mit Luftspalt / with air-gap



Bestell-Nr. Order-No.	mögliche Dicke pos. Thickness	Typ	a	b	c	d	e	f	h	i	(k ₁)	k ₂	t
11.086	0,35/0,50	EI 75	75,0	50,0	37,5	25,0	50,0	12,5	4,5	62,5	6,25	43,75	1,15
11.088	0,35/0,50	EI 75	75,0	50,0	37,5	25,0	50,0	12,5	4,5	62,5	6,25	43,75	1,60
11.099	0,35	EI 78	78,0	52,0	39,0	26,0	52,0	13,0	4,5	65,0	6,50	45,50	0,40
11.376	0,35	EI 78	78,0	52,0	39,0	26,0	52,0	13,0	4,5	65,0	6,50	45,50	0,70
11.093	0,35/0,50	EI 78	78,0	52,0	39,0	26,0	52,0	13,0	4,5	65,0	6,50	45,50	1,00
11.373	0,35/0,50	EI 78	78,0	52,0	39,0	26,0	52,0	13,0	4,5	65,0	6,50	45,50	1,40
11.109	0,50	EI 78	78,0	52,0	39,0	26,0	52,0	13,0	4,5	65,0	6,50	45,50	2,00
11.119	0,35	EI 84	84,0	56,0	42,0	28,0	56,0	14,0	4,5	70,0	7,00	49,00	0,45
11.147	0,35/0,50	EI 84	84,0	56,0	42,0	28,0	56,0	14,0	4,5	70,0	7,00	49,00	0,85
11.388	0,35	EI 84	84,0	56,0	42,0	28,0	56,0	14,0	4,5	70,0	7,00	49,00	1,00
11.114	0,50	EI 84	84,0	56,0	42,0	28,0	56,0	14,0	4,5	70,0	7,00	49,00	2,08
11.375	0,50	EI 90	90,0	60,0	45,0	30,0	60,0	15,0	4,5	75,0	7,50	52,50	2,00
11.123	0,50	EI 90	90,0	60,0	45,0	30,0	60,0	15,0	4,5	75,0	7,50	52,50	4,00
11.136	0,35/0,50	EI 96	96,0	64,0	48,0	32,0	64,0	16,0	5,5	80,0	8,00	56,00	0,75
11.133	0,50	EI 96	96,0	64,0	48,0	32,0	64,0	16,0	5,5	80,0	8,00	56,00	1,30
11.137	0,50	EI 96	96,0	64,0	48,0	32,0	64,0	16,0	5,5	80,0	8,00	56,00	1,95
11.421	0,50	EI 96	96,0	64,0	48,0	32,0	64,0	16,0	5,5	80,0	8,00	56,00	3,50
11.144	0,35/0,50	EI 105	105,0	70,0	52,5	35,0	70,0	17,5	5,5	87,5	8,75	61,25	3,50
11.164	0,35/0,50	EI 120	120,0	80,0	60,0	40,0	80,0	20,0	7,0	100,0	10,00	70,00	2,10
11.168	0,35/0,50	EI 120	120,0	80,0	60,0	40,0	80,0	20,0	7,0	100,0	10,00	70,00	3,00
11.171	0,35/0,50	EI 120	120,0	80,0	60,0	40,0	80,0	20,0	7,0	100,0	10,00	70,00	4,00
11.182	0,35/0,50	EI 135	135,0	90,0	67,5	45,0	90,0	22,5	7,5	112,5	11,25	78,75	7,00
11.191	0,35/0,50	EI 150N	150,0	100,0	75,0	50,0	100,0	25,0	8,0	125,0	12,50	87,50	1,25
11.193	0,35/0,50	EI 150N	150,0	100,0	75,0	50,0	100,0	25,0	8,0	125,0	12,50	87,50	3,80
12.532	0,35	EI 195	195,0	152,5	125,0	55,0	140,0	27,5	11,0	170,0	12,50	140,00	3,00

Details unter...

www.waasner.de

For details...

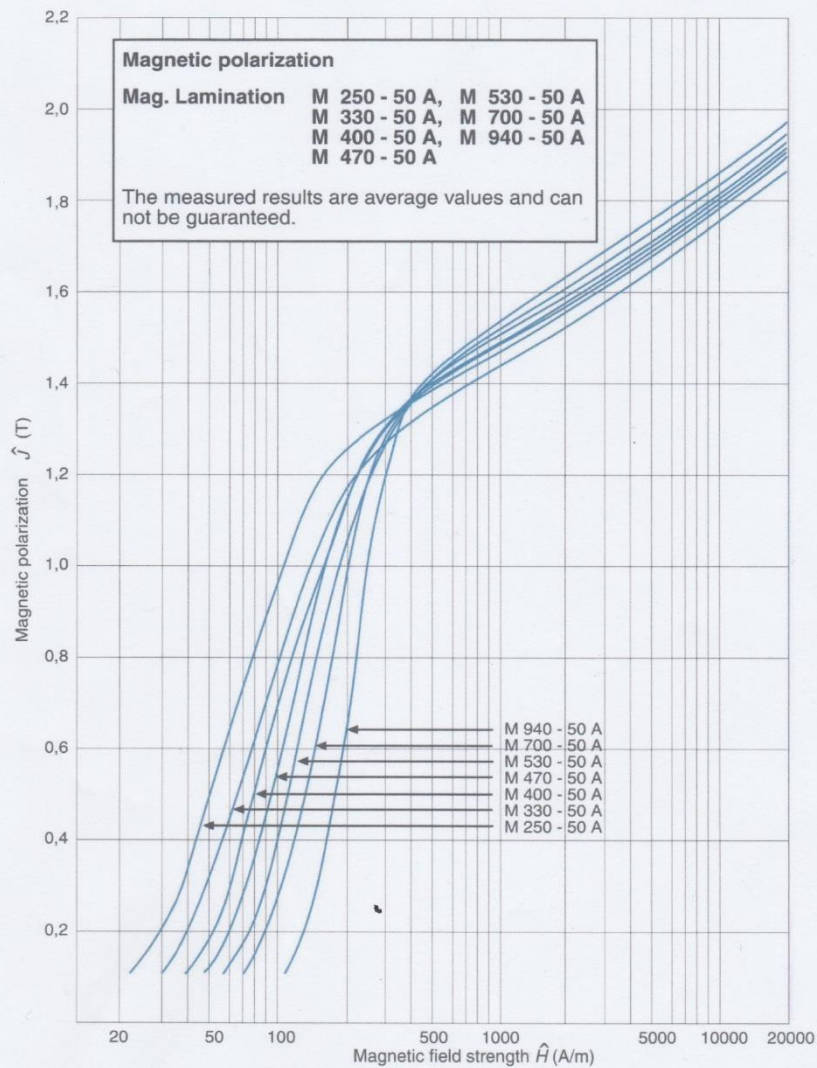
11

Příloha 2 – Charakteristika magnetické polarizace podle typu plechů[11]



Magnetic polarization 50A

Material characteristics
for basic material - not stamped parts



Příloha 3 – Charakteristika závislosti permeability na intenzitě magnetického pole podle typu plechů[11]



Amplitude permeability figure 50A

**Material characteristics
for basic material - not stamped parts**

