

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektrotechniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Návrh jednofázového transformátoru s dvojitým
sekundárním vinutím**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

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

Jméno a příjmení: **Matěj KANDRÁČ**
Osobní číslo: **E15B0060P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Návrh jednofázového transformátoru s dvojitým sekundárním vinutím**
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. Navrhnete jednofázový transformátor s dvojitým sekundárem dle zadání vedoucího práce.
2. Ověřte návrh metodou konečných prvků.
3. Nakreslete rozměrový výkres stroje.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Petrov, Georgij Nikolajevič. Elektrické stroje 1: úvod-transformátory. Vyd. 1. Praha: Academia, 1980. 385 s.
2. Patočka, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2011. 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.
3. Faktor, Zdeněk. Transformátory a cívky. Praha: BEN, 1999. ISBN 80-86056-49-X.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Šobra

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 5. října 2018

Termín odevzdání bakalářské práce: 13. června 2019


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na úplný technický návrh jednofázového transformátoru a teoretický návrh. Výsledkem je konstrukce s výkresy magnetického obvodu, vinutí, kostra transformátoru a 2D rozložení magnetického pole.

Klíčová slova

Transformátor, jednofázový transformátor, dvojitě sekundární vinutí.

Abstract

The bachelor thesis is focusing on the principles of complete technical design of one-phase transformer and theoretical design. The result is complete construction with drawings of magnetic circuit and distribution 2D field.

Keywords

Transformer, one-phase transformer, double secondary winding

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 11.6.2019

Matěj Kandráč

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Šobrovi PhD za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Mé poděkování dále patří i dalším, kteří mě při psaní práce plně podporovali.

OBSAH

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD.....	11
1. TRANSFORMÁTOR.....	12
1.1. Magnetický obvod.....	12
1.1.1. Et plechy	13
1.1.2. Eo plechy	14
1.1.3. Ei plechy	14
1.2. Vinutí transformátoru	14
1.2.1. Základní požadavky	14
1.2.2. Konstrukce vinutí.....	15
1.2.3. Transformátor se třemi vinutími	15
1.3. Oteplení a chlazení trafo.....	16
2. VÝPOČET TRAFU.....	18
2.1. Zadání:.....	18
2.2. Počet závitů:	20
2.3. Průměry vodičů.....	21
2.4. Délka vinutí:	22
2.4.1. Primární vinutí:	22
2.4.2. Sekundární vinutí:.....	23
2.4.3. Terciální vinutí:.....	24
2.5. Odpor vinutí.....	25
2.6. Výpočet reaktancí.....	26
2.7. Výpočet ztrát	29
2.7.1. Výpočet ztrát v železe	29
2.7.2. Výpočet joulových ztrát	30
2.8. Fázorový diagram.....	30
2.9. Oteplení.....	32
2.10. Výpočet účinnosti	34
2.10.1. Celkové ztráty	34
2.11. Rozměrový výkres.....	34
3. METODA KONEČNÝCH PRVKŮ.....	36
ZÁVĚR	39
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	41
PŘÍLOHY.....	1

Seznam symbolů a zkratk

B_m	Maximální indukce (T)
$\cos\varphi$	Účinnost transformátoru (-)
d_1, d_2, d_3	Průměry vodičů (mm)
f	Frekvence (Hz)
$F_{m\delta}$	Magnetomotorické napětí (A)
H_s	Skutečná intenzita magnetického pole (A/m)
I_1, I_2, I_3	Proudy transformátoru (A)
I_m	Magnetizační proud (A)
l_{xy}	Délky závitů transformátoru v jednotlivých řadách (mm)
m_{fe}	Hmotnost magnetického obvodu (kg)
N_1, N_2, N_3	Počet závitů transformátoru
P_0	Činný výkon na prázdko (W)
ΔP_{Fe}	Ztráty magnetického obvodu (W)
ΔP_{j1}	Joulové ztráty v primárním vinutí (W)
ΔP_{j2}	Joulové ztráty v sekundárním vinutí (W)
ΔP_{j3}	Joulové ztráty v terciálním vinutí (W)
ΔP_j	Celkové ztráty ve vinutí (W)
ΔP	Celkové ztráty (W)
Q_0	Jalový výkon na prázdko (VAr)
Q_μ	Magnetizační jalový výkon (VAr)
R_1, R_2, R_3	Odpory vodičů (Ω)
R'_1, R'_2, R'_3	Přepočtené odpory vodičů na primární stranu (Ω)
R_{Fe}	Odpor železa (Ω)
S	Zdánlivý výkon transformátoru (VA)
S_0	Zdánlivý výkon na prázdko (VA)
S_1, S_2, S_3	Průřezy vodičů (mm)
S_{Fe}	Průřez železa (m ²)
S_{FeS}	Skutečný průřez železa (m ²)
U_1	Primární napětí transformátoru (V)
U_2	Sekundární napětí transformátoru (V)

U_{1z}	Napětí na jednom závitě (V)
U_i	Indukované napětí (V)
V_{sls}	Objem sloupku I plechu (m^3)
V_{slp}	Objem prostředního sloupku E plechu (m^3)
V_{slk}	Objem krajního sloupku E plechu (m^3)
V_{Fe}	Objem magnetického obvodu (m^3)
x	Šířka vinutí (mm)
$X_{\sigma p}$	Rozptylová reaktance primárního vinutí (Ω)
$X_{\sigma s, 2}$	Rozptylová reaktance sekundárního a terciálního vinutí (Ω)
X_{μ}	Magnetizační reaktance (Ω)
η	Účinnost (-)
ρ_{fe}	Měrná hmotnost železa (kg/m^3)
σ	Proudová hustota (A/m^2)

Úvod

Bakalářská práce je rozdělena do dvou částí teoretické a praktické. V teoretické části je představen transformátor a jeho jednotlivé části, použití, vlastnosti s EI plechy a teorií dvojitého sekundárního vinutí.

Druhá část se zabývá výpočtem transformátoru, jak po teoretické tak zároveň po konstrukční stránce. V konečné fázi výpočtů je ověření metodou konečných prvků, který ověřuje správnost výpočtů. Výpočty byly provedeny se snahou o největší přesnost ke skutečnosti. Při návrzích je v práci odkazováno na řadu technických norem, aby byl návrh uskutečnitelný a zároveň, co nejlevnější. K výpočtům je také použit program Matlab, který je dostupný ve škole, pomohl zrychlit a celkově optimalizovat kompletní výpočet. Umožňuje vytvořit skript, kam se vypíše všechny potřebné vzorce a tím se celkový výpočet zjednoduší. Pro výpočet samotný byla využita zadaná literatura, vzorce, které byly vyučovány na fakultě, zároveň byla využita literatura v podobě technických článků pro inspiraci a ověření metod.

V třetí části práce byl použit dostupný program FEMM pro vyřešení a vymodelování magnetického pole transformátoru.

V závěru práce byl nakreslen rozměrový výkres pomocí programu Solid Works, kterým byl nakreslen celý transformátor s jeho dalšími pohledy.

1. Transformátor

Transformátor se velmi často používá jako měnič střídavého proudu. Je to elektrický netočivý stroj, který přeměňuje elektrickou energii. Dokáže snížit a zvýšit napětí, mění počet fází a v některých případech mění i kmitočet střídavého proudu [1].

Nejčastěji se používají pro přenos i rozvod elektrické energie, přeměnu elektrického proudu v různých zařízeních, spojích, radiotechnice, automatizačních a regulačních zařízeních. Na výkonu, napětí a účelu transformátoru závisí jeho použití [1].

Funkce transformátoru vychází z Faradayova zákona elektromagnetické indukce, kde napětí indukované ve smyčce je přímo úměrné změně magnetického toku [2]. U transformátoru dojde k indukci napětí v sekundárním vinutí a vlivem působení proměnlivého magnetického toku, jenž je vyvoláván proudem primárním, začne procházet proud sekundárním vinutím [2].

Jednofázový transformátor se skládá z magnetického obvodu, vinutí a kostry [2].

1.1. Magnetický obvod

Magnetický obvod uzavírá magnetický tok dále ho rozdělujeme na jádro a spojky. Ty bývají skládané z plechů o tloušťce 0,35 a 0,5 mm. Plechy se tímto od sebe izolují a snižují se tak ztráty vířivými proudy nebo upravíme samostatný materiál přidáním příměsí (křemík). Plechy, které použil autor v elektrotechnickém návrhu jsou z železa s příměsí křemíku. Křemík zvýší celkový odpor a sníží tím jejich ztráty. Dále tu máme ztráty hysterezní, které se omezují orientováním plechů. Válcují se za studena a tím se i zvyšují jejich vlastnosti při magnetování [2].

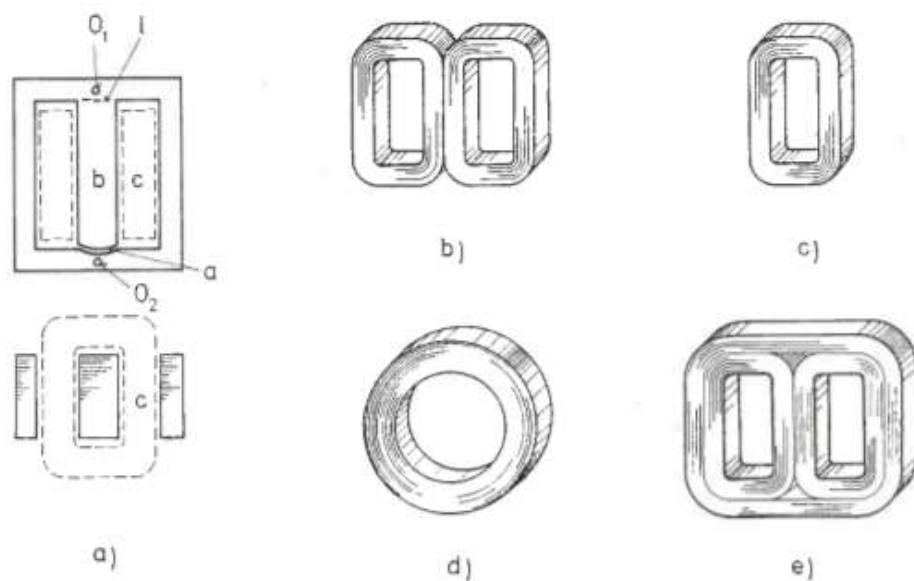
Při návrhu síťového transformátoru do kmitočtu 50 Hz lze ztráty hysterezní a vířivými proudy sloučit do ztrátového čísla p_{15} a to udává měrný ztrátový výkon při indukci 1,5 T a frekvenci 50 Hz [3]. Pro výpočet ztrát v magnetickém obvodu se ztrátové číslo vynásobí hmotností magnetického obvodu a najdeme ho v katalogu od výrobce magnetických materiálů [3].

Můžeme dělit transformátor i podle provedení magnetického obvodu a provedení spojení jádra a spojek [2].

Podle provedení magnetického obvodu transformátor může být jádrový a plášťový. U plášťového jádra je cívka navinuta uvnitř, cívka je tudíž obklopena magnetickým obvodem, zatím co u jádrového se cívka navíjí po stranách [2].

Podle spojení dělíme s tupým stykem nebo přeplátované. U tupých styků se jádra i spojky složí samostatně a následně se spojí v jeden obvod pomocí stahovacích svorníků [1]. U přeplátovaných styků se jádra i spojky skládají současně a vinutí se vloží tak, že vyjmeme horní část spojky, vloží se vinutí, a následně spojka vsune zpět [1].

Konstrukce magnetických obvodů u malých transformátorů do výkonů desítek VA se dělají s ohledem na minimální odpad a jednoduchost. Razí se jedním úderem razidla a v případě plášťového magnetického obvodu vznikne malá vzduchová mezera. Díky mezeře se prostřední sloupek ohne, vloží se tak cívka dovnitř a u dalšího plechu se postupuje následovně s výjimkou, že se vloží z druhé strany [1].



Obrázek 1: Magnetické obvody malých transformátorů
 a) jednofázový plášťový, páskové magnetické obvody b) plášťový
 c) jádrový d) toroidní e) trojfázový [1]

1.1.1. Et plechy

Plechy typu Et byli nejstaršími a dnes už nevyroběnými plechy a byli vytvářeny technologií „za tepla“ a díky této výrobě mají i odlišné magnetické vlastnosti než plechy typu EI a Eo [3]. Byly charakterizovány ztrátovým číslem p_1 a měli tloušťku 0,35 mm [3].

Dříve byli používané převážně pro výrobu stejnosměrného proudu, proto se byly označovány za dynamové hlavně ty, kterým ztrátové číslo bylo měřeno od 1,8 W/kg [3]. Typy

plechů byli např.: Et 1.3, Et 1.3 a čísla vyjadřovala tvrdost plechů [3].

1.1.2. Eo plechy

Tyto plechy nahradili převážně Et plechy pro konstrukci transformátorů a jsou válcované za studena [3]. Válcováním za studena dochází k orientaci krystalů a tím k magnetické textuře. Hrana krychle v kubické soustavě, kde železo krystalizuje, se pak lépe magnetuje ve směru hrany a špatně ve směru plošném úhlopříčném [3]. Takto se vyrábějí i plechy Ei [3].

Plechů jsou pak dopravovány ke spotřebitelům ve velkých svitech o hmotnosti 1 t [3].

Třídění mají stejné jako ostatní např.: Eo 9, Eo10, Eo 11 kde číslo označuje ztrátové číslo a jsou opracovány do tloušťky 0,28 a 0,35 mm. Pro omezení odpadu se z výlisků ořezávají C jádra[3].

1.1.3. EI plechy

Pro konstrukci magnetických obvodů malých asynchronních motorů a transformátorů se používají plechy typu Ei, bývají izotropní a válcované za studena [3]. Mívají stejné magnetické vlastnosti ve směru kolmém a válcovaném. S ohledem na jiné plechy, mají Ei plechy nižší hysterezní ztráty a lepší mechanické vlastnosti (jsou hladší a mají lepší činitel plnění) [3]. Jednotlivé plechy se rozdělují podle kvality, např.: Ei 33, EI 40, Ei 50, kde čísla značí ztráty v desetinách wattu na kilogram při indukci $B=1,5$ T a frekvenci $f=50$ Hz, a podle tloušťky (0,5mm a 0,35mm) [3].

1.2. Vinutí transformátoru

1.2.1. Základní požadavky

Na vinutí transformátoru se kladou pět základních požadavků:

Za první mechanickou pevnost. Aby vinutí sneslo mechanické namáhání během převozu, montáže ale i při zkratech a to bez poškození, neboť na závity při zkratech působí velké elektromagnetické síly [1].

Za druhé elektrickou pevnost, kdy musí izolace vydržet dlouhodobé i krátkodobé namáhání elektrickým proudem [1].

Za třetí musí být vinutí technologicky proveditelné a to z hlediska jednoduchosti tak i ekonomičnosti (levné) [1].

Za čtvrté musí splňovat odolnost proti tepelnému namáhání, proto díky konstrukci vinutí zajišťujeme potřebné chlazení, při níž teplota izolace nepřekročí kritickou mez [1].

A za páté, kdy elektrické ztráty vinutí budou optimální pro ekonomický provoz [1].

1.2.2. Konstrukce vinutí

Hlavními veličinami pro druh konstrukce vinutí jsou jmenovité napětí a proud. Na magnetické jádro transformátoru typu EI se obě cívky jak primární tak sekundární, popřípadě terciální, se navíjí na prostřední sloupek kostry [3]. Vinutí spolu s jádrem umožní vytvořit požadovanou indukčnost, ale vzniknou i nepříznivé jevy jako odpor vinutí, rozptylová indukčnost, dielektrické ztráty a u silových transformátorů i teplo [3]. Úkolem správnosti výpočtu a vhodného typu vinutí je tyto nepříznivé jevy udržet v příznivých mezích [3].

Nejčastěji se používá lakovaná, měkká elektrovedná měď [3].

1.2.3. Transformátor se třemi vinutími

Často se v různých elektrotechnických oborech setkáváme s požadavkem pro vzájemné spojení několik obvodů o různých napětích [1]. Toto se lehce a hospodárně využít u transformátorů se třemi a více vinutími [1]. Takovýto transformátor má jen jeden magnetický obvod, jeden či více vstupních a výstupních vinutí [1].

Transformátor se třemi vinutími můžeme rozdělit na [1]:

Transformátor s jedním vstupním a dvěma výstupními vinutími

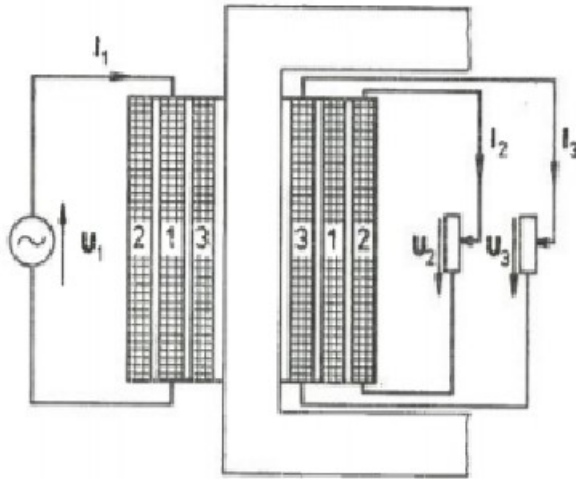
Transformátor s dvěma vstupními a jedním výstupním vinutím.

Nejrozšířenější transformátory jsou s jedním vstupním a dvěma výstupními vinutími a používají se převážně v radiotechnických zařízeních [1]. Platí-li pro ně, že vinutí číslo 1 připojeno ke zdroji střídavého proudu a vinutí číslo 2 a 3 jsou zatížena, pak můžeme pro ně napsat:

$$U_1 = j\omega(L_{11} \cdot I_1 + M_{12} \cdot I_2 + M_{13} \cdot I_3) + R_1 \cdot I_1$$

$$-U_2 = j\omega(M_{21} \cdot I_1 + L_{22} \cdot I_2 + M_{23} \cdot I_3) + R_2 \cdot I_2$$

$$-U_3 = j\omega(M_{31} \cdot I_1 + M_{32} \cdot I_2 + L_{33} \cdot I_3) + R_3 \cdot I_3.$$



Obrázek 2: Trojvinutový transformátor

1.3. Oteplení a chlazení trafo

Faktory, které nejvíce ovlivňují rozměry a váhu transformátorů je okolní teplota a teplo, které vzniká vlivem jeho činnosti [3]. Když budeme zvyšovat přípustné oteplení izolace vinutí tak zapříčiníme zbytečné zvyšování se nároky na cenu, na druhou stranu, pokud podceníme oteplení, může to přispět k vyššímu stárnutí celého transformátoru nebo až ke zničení jeho vinutí [3]. Experimentem bylo zjištěno, že zvýšení teploty o 8 °C snižuje životnost izolace na polovinu [1]. Tudiž maximální teplota vinutí uvnitř magnetického obvodu, pro kterou je transformátor navrhnout, se nesmí překročit[3]. Ku pomoci tu máme tepelnou třídu izolací [3].

Třída izolace	Přibližná max. teplota na povrchu vinutí (°C)	Maximální teplota vinutí (°C)
Y	80	90
A	95	105
E	110	120
B	115	130
F	140	155
H	160	180
200	180	200
220	200	220

Tabulka 1: Tepelné třídy izolace [3]

Transformátor je nehomogenní těleso z hlediska oteplení, kde magnetický obvod se vyznačuje velkou tepelnou vodivostí a malou tepelnou kapacitou a vinutí je na tom

obdobně [1]. Hlavními zdroji tepla v transformátoru je vinutí a magnetický obvod a dochází mezi nimi ke sdílení tepla pomocí tepelné vodivosti [1].

U vzduchového transformátoru dochází k přestupu tepla do okolí konvekcí a sáláním [1]. To znamená, že při výpočtu samotného oteplení musíme provést zjednodušené výpočty, protože je výpočet pro jednotlivé části transformátoru by byl značně složitý [1].

2. Výpočet trafo

Výpočet jsem prováděl z knih [1], [3],[4],[5],[6], [7]a [8].

2.1. Základní parametry:

EI plechy

$U_1 = 230 \text{ V}$

$U_2 = 2 \times 24 \text{ V}$

$S = 500 \text{ VA}$

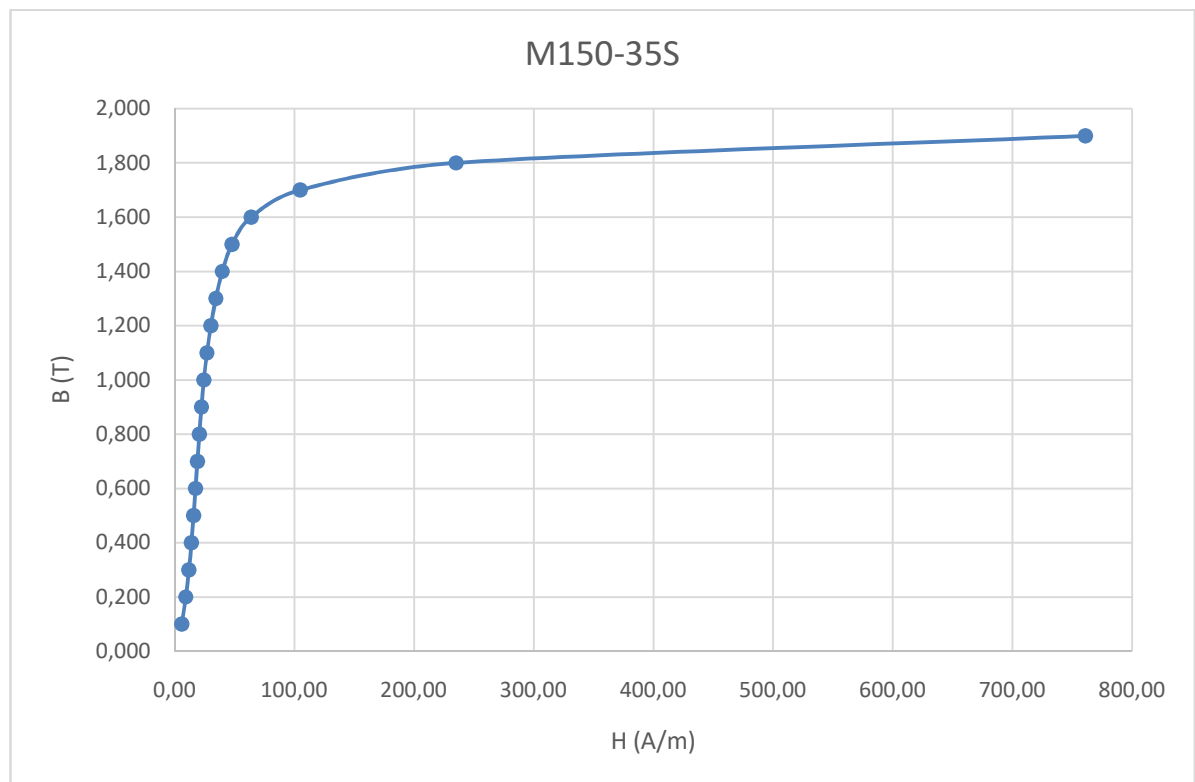
$f = 50 \text{ Hz}$

1 fáze, trvalé zatížení

chlazení: přirozený oběh vzduchu

Na začátek všeho počítání je vhodné znát minimální průřez magnetického jádra při zadaném zdánlivém výkonu S (VA), vhodné zvolené indukci B_m (T) a proudové hustotě σ (A/m^2) [4].

Zvolena byla indukce $B_m = 1,6 \text{ T}$ z měření magnetizačních křivek z [6] viz Graf 1. Byl vybrán materiál označený M150-35S [6].



Graf 1: Magnetizační křivka [6]

$$S_{Fe} = \sqrt[2]{\frac{4\sqrt{2} \cdot S}{3 \cdot \pi \cdot k_{Cu} \cdot k_{Fe} \cdot f \cdot B_{max} \cdot \sigma}} = \quad (2.1.1)$$

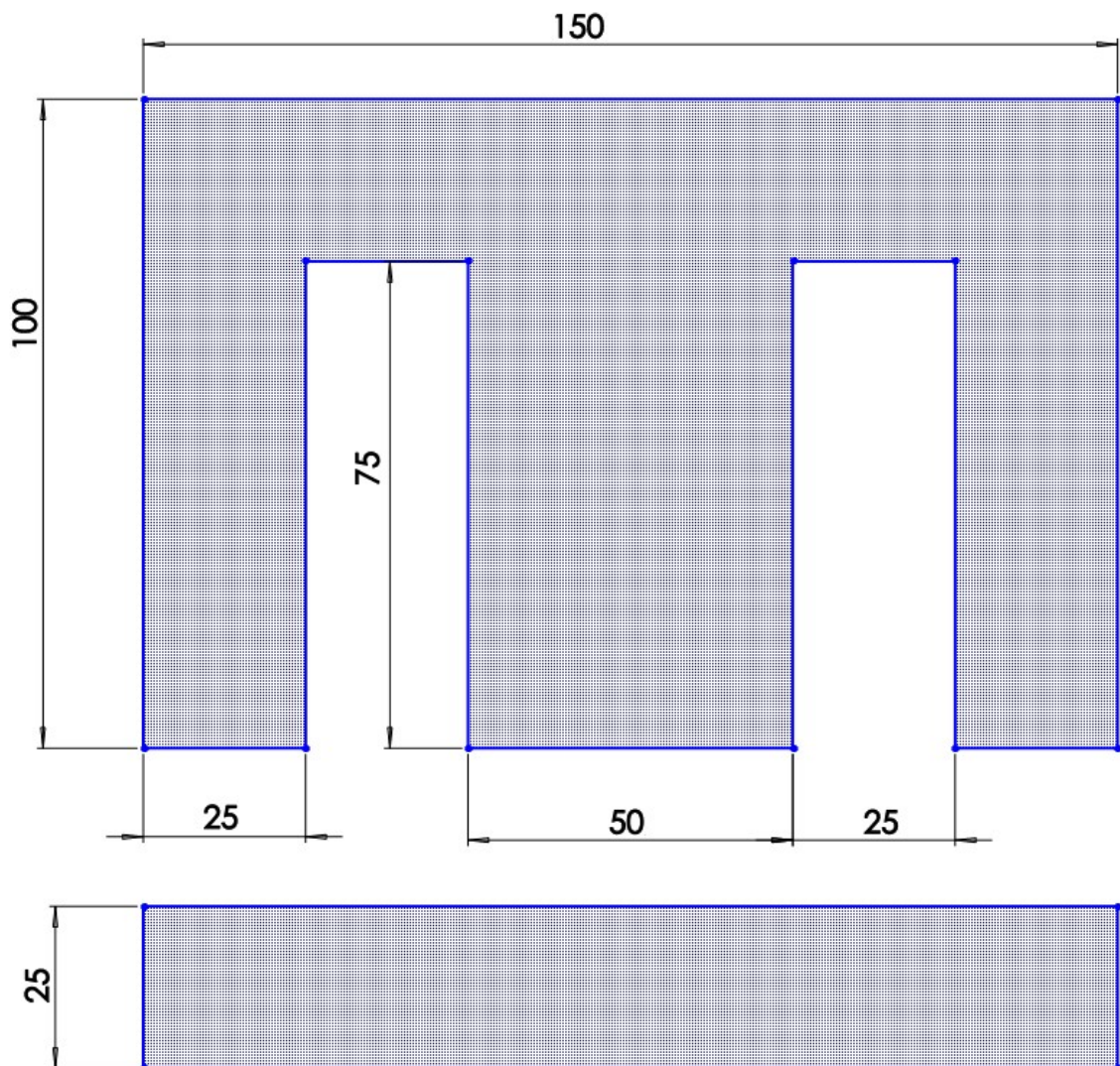
$$= \sqrt[2]{\frac{4\sqrt{2} \cdot 500}{3 \cdot \pi \cdot 0,3 \cdot 0,95 \cdot 50 \cdot 1,6 \cdot 2,5 \cdot 10^6}} = 0,0023\text{m}^2$$

kde k_{Cu} je koeficient plnění mědi

k_{Fe} je koeficient plnění železa

f je frekvence

Z této rovnice si pak můžeme zvolit magnetické jádro z normy (1). Z ní byly vybrány plechy typu EI 50, protože z norem pro kostru transformátoru (2) vychází přijatelný průřez jádra. Zvolená kostra má označení *YEI 1-50d-S*. Tato norma nám zjednodušila výběr průřezu h .



Obrázek 3: Rozměry EI plechu

h (mm)	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	e (mm)	f (mm)
51	150	100	75	50	25	25

Tabulka 2: Rozměry EI plechu

kde a je celková délka

b je výška E plechu

c je výška mezery

d je šířka středního sloupku

e je šířka krajního sloupku

f je výška I plechu

h je tloušťka jádra

Skutečný průřez jádra:

$$S_{Fes} = d \cdot h = 0,050 \cdot 0,051 = 0,00255 \text{ mm}^2 \quad (2.1.2)$$

2.2. Počet závitů:

Pro začátek je výpočet pro počet závitů z rovnice pro napětí na 1 závit sekundárního vinutí. s koeficientem plnění $k_{Fe} = 0,97$ a magnetickou indukci B z magnetizačních charakteristik z [6].

$$U_{1z} = 4,44 \cdot N \cdot B \cdot S \cdot f \cdot k_{Fe} = 4,44 \cdot 1 \cdot 1,6 \cdot 0,00255 \cdot 50 \cdot 0,97 = 0,8647 \text{ V} \cdot \text{závit}^{-1} \quad (2.2.1)$$

Určení počtů závitů sekundárního vinutí z rovnice (2.2.1):

$$N_2 = \frac{U_2}{U_{1z}} = \frac{24}{0,8647} = 28 \quad (2.2.2)$$

Určení počtů závitů terciálního vinutí z rovnice (2.2.1):

$$N_3 = \frac{U_2}{U_{1z}} = \frac{24}{0,8647} = 28 \quad (2.2.3)$$

Určení počtů závitů primárního vinutí z rovnice (2.2.1):

$$N_1 = \frac{U_1}{U_{1z}} = \frac{230}{0,8647} = 268 \quad (2.2.4)$$

Díky spočítanému průřezu a závitům si teď můžeme spočítat reálnou maximální magnetickou indukci v jádře.

$$B = \frac{U_1}{4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot S_{Fes} \cdot k_{fe}} = \frac{230}{4,44 \cdot 50 \cdot 268 \cdot 0,00255 \cdot 0,97} = 1,57 \text{ T} \quad (2.2.5)$$

Dále je výpočet proudů v jednotlivých vinutích.

$$I_1 = \frac{S}{U_1} = \frac{500}{230} = 2,1739 \text{ A} \quad (2.2.6)$$

$$I_2 = \frac{\frac{S}{2}}{U_2} = \frac{250}{24} = 10,4167 \text{ A} \quad (2.2.7)$$

$$I_3 = \frac{\frac{S}{2}}{U_3} = \frac{250}{24} = 10,4167 \text{ A} \quad (2.2.8)$$

2.3. Průměry vodičů

Po vypočítání všech proudů je možné vypočítat jednotlivé průřezy vodičů, kde pro definovanou proudovou hustotu jednotlivými vodiči $J = 2,5 \text{ A/mm}$ a proudy byly dosazeny z rovnic (2.2.6), (2.2.7) a (2.2.8).

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot I_1}{J \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,1739}{2,5 \cdot \pi}} = 1,0522 \text{ mm} \quad (2.3.1)$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot I_2}{J \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10,4167}{2,5 \cdot \pi}} = 2,303 \text{ mm} \quad (2.3.2)$$

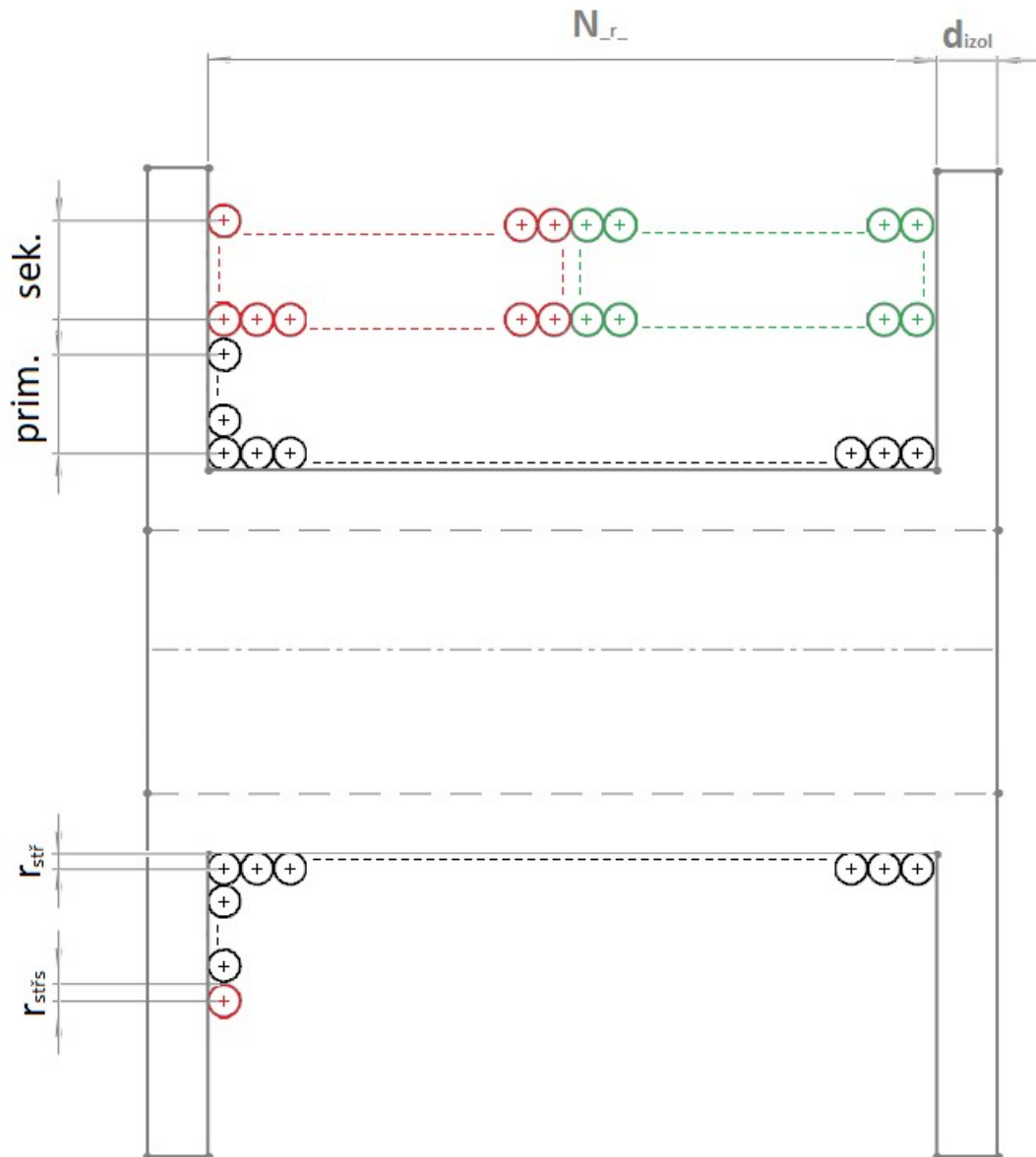
$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot I_3}{J \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10,4167}{2,5 \cdot \pi}} = 2,303 \text{ mm} \quad (2.3.3)$$

Z norem (3) bylo definováno jednotlivé průměry vodičů $d_1 = 1,120 \text{ mm}$, $d_2 = 2,5 \text{ mm}$ a $d_3 = 2,5 \text{ mm}$ k tomu byly přičteny nejmenší přírůstek izolace $d_{izolp} = 0,034 \text{ mm}$ pro průměr d_1 a $d_{izols} = 0,042 \text{ mm}$ pro průměr d_2 .

Kontrola proudové hustoty:

$$J_1 = \frac{4 \cdot I_1}{d_1^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 2,1739}{1,12^2 \cdot \pi} = 2,21 \text{ A/mm}^2 \quad (2.3.4)$$

$$J_2 = \frac{4 \cdot I_2}{d_2^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 10,4167}{2,5^2 \cdot \pi} = 2,12 \text{ A/mm}^2 \quad (2.3.5)$$



Obrázek 4: Uložení vinutí v kostře

2.4. Délka vinutí:

2.4.1. Primární vinutí:

$$l_{11} = N_{1r1} \cdot (2 \cdot d + 2 \cdot h + 2 \cdot \pi \cdot (r_{stř} + d_{izol})) = 63 \cdot (2 \cdot 50 + 2 \cdot 51 + 2 \cdot \pi \cdot (0,577 + 1)) = 13350 \text{ mm} \quad (2.4.1)$$

$$\begin{aligned}
 l_{12} &= N_{1r2} \cdot (2 \cdot d + 2 \cdot h + 2 \cdot \pi \cdot (r_{stř} + d_1 + d_{izolp} + d_{izol})) \\
 &= 63 \cdot (2 \cdot 50 + 2 \cdot 51 + 2 \cdot \pi \cdot (0,577 + 1,12 + 0,034 + 1)) \\
 &= 13807 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{2.4.2}$$

$$\begin{aligned}
 l_{13} &= N_{1r2} \cdot (2 \cdot d + 2 \cdot h + 2 \cdot \pi \cdot (r_{stř} + 2 \cdot (d_1 + d_{izolp}) + d_{izol})) \\
 &= 63 \cdot (2 \cdot 50 + 2 \cdot 51 + 2 \cdot \pi \cdot (0,577 + 2 \cdot (1,12 + 0,034) + 1)) \\
 &= 14264 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{2.4.3}$$

$$\begin{aligned}
 l_{14} &= N_{1r2} \cdot (2 \cdot d + 2 \cdot h + 2 \cdot \pi \cdot (r_{stř} + 3 \cdot (d_1 + d_{izolp}) + d_{izol})) \\
 &= 63 \cdot (2 \cdot 50 + 2 \cdot 51 + 2 \cdot \pi \cdot (0,577 + 3 \cdot (1,12 + 0,034) + 1)) \\
 &= 14721 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{2.4.4}$$

$$\begin{aligned}
 l_{15} &= N_{1r2} \cdot (2 \cdot d + 2 \cdot h + 2 \cdot \pi \cdot (r_{stř} + 4 \cdot (d_1 + d_{izolp}) + d_{izol})) \\
 &= 16 \cdot (2 \cdot 50 + 2 \cdot 51 + 2 \cdot \pi \cdot (0,577 + 4 \cdot (1,12 + 0,034) + 1)) \\
 &= 3854,6 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{2.4.5}$$

Celková délka primárního vinutí:

$$l_1 = l_{11} + l_{12} + l_{13} + l_{14} + l_{15} = 59996,4 \text{ mm} \tag{2.4.6}$$

2.4.2. Sekundární vinutí:

V neúplné řadě primárního vinutí, kdy poslední řada je složena pouze ze 16 vodičů navinutých vedle sebe jsou jednotlivé řady sekundárního vinutí rozděleny a vypočítány podle toho, kolik vodičů sekundárního vinutí zabírá pátou řadu primárního vinutí.

$$\begin{aligned}
 l_{21} &= N_{2r1} \cdot (2 \cdot d + 2 \cdot h + 2 \cdot \pi \cdot (r_{střs} + r_{stř} + 5 \cdot (d_1 + d_{izolp}) + d_{izol})) \\
 &= 7 \cdot (2 \cdot 50 + 2 \cdot 51 + 2 \cdot \pi \cdot (1,271 + 0,577 + 5 \cdot (1,12 + 0,034) + 1)) \\
 &= 1793 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{2.4.7}$$

$$\begin{aligned}
 l_{22} &= N_{2r1} \cdot (2 \cdot d + 2 \cdot h + 2 \cdot \pi \cdot (r_{střs} + r_{stř} + 4 \cdot (d_1 + d_{izolp}) + d_{izol})) \\
 &= 5 \cdot (2 \cdot 50 + 2 \cdot 51 + 2 \cdot \pi \cdot (1,271 + 0,577 + 4 \cdot (1,12 + 0,034) + 1)) \\
 &= 1244,5 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{2.4.8}$$

$$\begin{aligned}
 l_{23} &= N_{2r2} \cdot (2 \cdot d + 2 \cdot h + 2 \cdot \pi \cdot (r_{střs} + r_{stř} + 5 \cdot (d_1 + d_{izolp}) + d_{izol} + d_2 \\
 &\quad + d_{izols}) + 2 \cdot \pi \cdot (1,271 + 0,577 + 5 \cdot (1,12 + 0,034) + 1 + 2,5 + 0,042)) \\
 &= 1904,8 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{2.4.9}$$

$$\begin{aligned}
 l_{24} &= N_{2r2} \cdot (2 \cdot d + 2 \cdot h + 2 \cdot \pi \cdot (r_{střs} + r_{stř} + 5 \cdot (d_1 + d_{izolp}) + d_{izol} + d_2 \\
 &\quad + d_{izols}) = 5 \cdot (2 \cdot 50 + 2 \cdot 51 + \\
 &\quad + 2 \cdot \pi \cdot (1,271 + 0,577 + 4 \cdot (1,12 + 0,034) + 1 + 2,5 + 0,042)) \\
 &= 1324,3 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{2.4.10}$$

$$\begin{aligned}
 l_{25} &= N_{2r3} \cdot (2 \cdot d + 2 \cdot h + 2 \cdot \pi \cdot (r_{střs} + r_{stř} + 5 \cdot (d_1 + d_{izolp}) + d_{izol} + 2 \\
 &\quad \cdot (d_2 + d_{izols})) = 4 \cdot (2 \cdot 50 + 2 \cdot 51 + \\
 &\quad + 2 \cdot \pi \cdot (1,271 + 0,577 + 5 \cdot (1,12 + 0,034) + 1 + 2 \cdot (2,5 + 0,042))) \\
 &= 1152,4 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{2.4.11}$$

Celková délka sekundárního vinutí:

$$\begin{aligned}
 l_2 &= l_{21} + l_{22} + l_{23} + l_{24} + l_{25} = \\
 &= 1793 + 1244,5 + 1904,8 + 1324,3 + 1152,4 = \\
 &= 7419,1 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{2.4.12}$$

2.4.3. Terciální vinutí:

$$\begin{aligned}
 l_{31} &= N_{3r11} \cdot (2 \cdot d + 2 \cdot h + 2 \cdot \pi \cdot (r_{střs} + r_{stř} + 5 \cdot (d_1 + d_{izolp}) + d_{izol})) \\
 &= 12 \cdot (2 \cdot 50 + 2 \cdot 51 + \\
 &\quad + 2 \cdot \pi \cdot (1,271 + 0,577 + 4 \cdot (1,12 + 0,034) + 1 + 2,5 + 0,042)) \\
 &= 2986,8 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{2.4.13}$$

$$\begin{aligned}
 l_{32} &= N_{3r21} \cdot (2 \cdot d + 2 \cdot h + 2 \cdot \pi \cdot (r_{střs} + r_{stř} + 4 \cdot (d_1 + d_{izolp}) \\
 &\quad + d_{izol} + 2 \cdot (d_2 + d_{izols}))) = 12 \cdot (2 \cdot 50 + 2 \cdot 51 + \\
 &\quad + 2 \cdot \pi \cdot (1,271 + 0,577 + 4 \cdot (1,12 + 0,034) + 1 + 2 \cdot (2,5 + 0,042))) \\
 &= 3178,4 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{2.4.14}$$

$$\begin{aligned}
 l_{33} &= N_{3r31} \cdot (2 \cdot d + 2 \cdot h + 2 \cdot \pi \cdot (r_{střs} + r_{stř} + 4 \cdot (d_1 + d_{izolp}) \\
 &\quad + d_{izol} + 2 \cdot (d_2 + d_{izols}))) = 4 \cdot (2 \cdot 50 + 2 \cdot 51 + \\
 &\quad + 2 \cdot \pi \cdot (1,271 + 0,577 + 4 \cdot (1,12 + 0,034) + 1 + 2 \cdot (2,5 + 0,042))) = \\
 &= 1123,4 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{2.4.15}$$

Celková délka terciálního vinutí:

$$l_3 = l_{31} + l_{32} + l_{33} = 2962,8 + 3154,4 + 836,5 = 7288,6 \text{ mm} \tag{2.4.16}$$

kde $r_{stř}$ je střední poloměr vodiče

d_{izol} je tloušťka izolace

l_{xy} jsou délky vodičů v jednotlivých řadách.

N_{xy} je počet vodičů v jedné řadě

2.5. Odpor vinutí

Z normovaných průměrů, které jsou dosazeny z rovnic (2.3.1), (2.3.2) a (2.3.3) se vypočítá průřez jednotlivých vinutí.

Průřez vodiče pro výpočet odporu primárního vinutí:

$$S_1 = \pi \cdot \left(\frac{d_1}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{1,12}{2}\right)^2 = 0,9852 \text{ mm}^2 \quad (2.5.1)$$

Průřez vodiče pro výpočet odporu sekundárního vinutí:

$$S_2 = \pi \cdot \left(\frac{d_2}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{2,5}{2}\right)^2 = 4,909 \text{ mm}^2 \quad (2.5.2)$$

Průřez vodiče pro výpočet odporu terciálního vinutí:

$$S_3 = \pi \cdot \left(\frac{d_3}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{2,5}{2}\right)^2 = 4,909 \text{ mm}^2 \quad (2.5.3)$$

Po výpočtu průřezů jednotlivých vodičů jsou dále vypočítány odpory vodičů. Z rovnic (2.4.6), (2.4.12) a (2.4.16) pro celkové délky, z rovnic (2.5.1), (2.5.2) a (2.5.3) pro průřezy vodičů a $\rho = 0,01789 \mu\Omega m$ je rezistivita mědi při 20 °C, jsou počítány odpory pro jednotlivé vinutí.

Výpočet odporů primárního vinutí:

$$R_1 = \rho \cdot \frac{l_1}{S_1} = 0,01789 \cdot \frac{59,9964}{9,852 \cdot 10^{-7}} = 1,09 \Omega \quad (2.5.4)$$

Sekundárního vinutí:

$$R_2 = \rho \cdot \frac{l_2}{S_2} = 0,01789 \cdot \frac{7,4191}{4,909 \cdot 10^{-6}} = 0,027 \Omega \quad (2.5.5)$$

Přepočtení na primární stranu:

$$R'_2 = R_2 \cdot k^2 = 0,027 \cdot 9,57^2 = 2,47 \Omega \quad (2.5.6)$$

Terciálního vinutí:

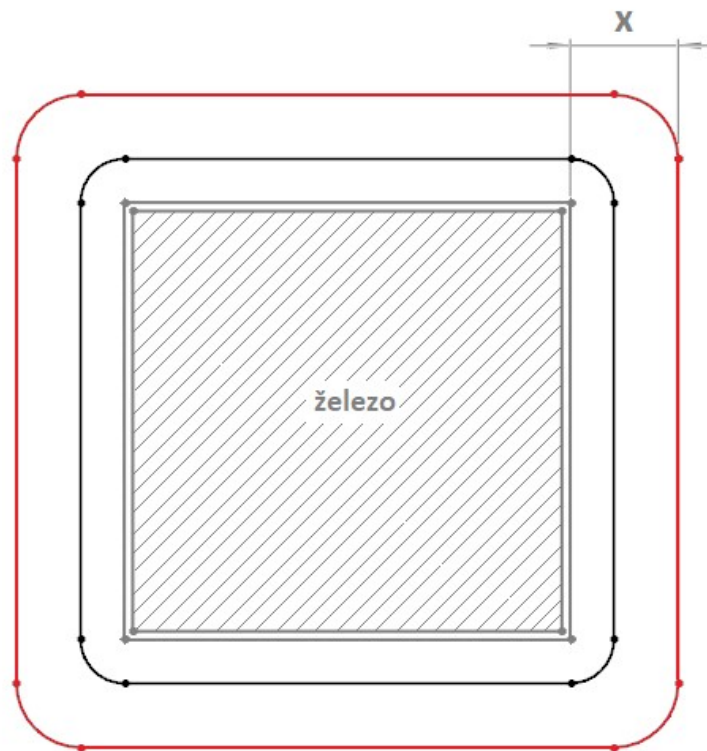
$$R_3 = \rho \cdot \frac{l_3}{S_3} = 0,01789 \cdot \frac{7,2886}{4,909 \cdot 10^{-6}} = 0,0266 \Omega \quad 2.5.7$$

Přepočtení na primární stranu:

$$R'_3 = R_3 \cdot k^2 = 0,0253 \cdot 9,57^2 = 2,32 \Omega \quad (2.5.8)$$

2.6. Výpočet reaktancí

Pro výpočet magnetizační reaktance nejprve musíme vypočítat rozptylovou reaktanci $X_{\sigma p}$.



Obrázek 5: Příklad vinutí

Šířka vinutí:

$$x = \frac{(5 \cdot d_1 + 4 \cdot d_1)}{2} + 3 \cdot d_2 = \frac{(5 \cdot 1,154 + 4 \cdot 1,154)}{2} + 3 \cdot 2,542 = 12,819 \text{ mm} \quad (2.6.1)$$

kde x je celková šířka vinutí.

$$X_{\sigma p} = \omega \cdot \mu_0 \cdot \frac{l_{1zav}}{\lambda_x \cdot c} \cdot N_1^2 \cdot \left(b \cdot \frac{x+x}{3} \right) = 314,16 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0,207}{\lambda_x \cdot 0,075} \cdot 268^2 \cdot \left(0,05 \cdot \frac{0,0128 + 0,0128}{3} \right) = 0,02 \Omega \quad (2.6.2)$$

kde $\lambda_x = \frac{\kappa}{\kappa - 1 + e^{-\kappa}}$ je korekční činitel, $\kappa = \frac{\pi \cdot h}{a+b+a}$ je průměrná délka vinutí a l_{1zav} je délka jednoho závitu.

$$X_{\sigma s1,2} = \omega \cdot \mu_0 \cdot \frac{l_{1zav}}{\lambda_x \cdot c} \cdot N_2^2 \cdot \left(b \cdot \frac{x+x}{3} \right) = 314,16 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0,242}{\lambda_x \cdot 0,075} \cdot 28^2 \cdot \left(0,05 \cdot \frac{0,0128 + 0,0128}{3} \right) = 0,264 \text{ m}\Omega \quad (2.6.3)$$

Vzhledem k poloze sekundární a terciální reaktanci z náhradního schématu musíme uvažovat v paralelní kombinaci.

$$k'_{\sigma s} = \frac{X_{\sigma s1,2} \cdot X_{\sigma s1,2}}{X_{\sigma s1,2} + X_{\sigma s1,2}} \cdot k^2 = \frac{0,264 \cdot 0,264}{0,264 + 0,264} \cdot 9,58^2 = 0,0121 \text{ m}\Omega \quad (2.6.4)$$

kde $X_{\sigma p}$ je reaktance primárního vinutí a $X_{\sigma s}$ je reaktance sekundárního a terciálního vinutí.
 k je převod transformátoru

Odpor železa se vypočítá ze ztrát (2.7.6) a indukovaného napětí. Indukované napětí se vypočítá jako rozdíl napětí primárního a vektorového součtu ztrát naprázdno na primárním vinutí z rovnice (2.6.6).

Z vypočítané reálné indukce (2.2.5) a ze znalosti magnetizační charakteristiky Graf 1 si můžeme vypočítat i skutečnou intenzitu magnetického pole H_s .

$$H_s = \frac{1,57}{1,6} \cdot 63,96 = 62,76 \text{ A/m} \quad (2.6.5)$$

Výpočet magnetizačního proudu:

$$\begin{aligned} I_m &= \frac{1}{N_1} \cdot (3 \cdot H_s \cdot l_j + 2 \cdot H_s \cdot l_s + 3 \cdot F_{m\delta}) = \\ &= \frac{1}{268} \cdot (3 \cdot 62,76 \cdot 0,075 + 2 \cdot 62,76 \cdot 0,05 + 1,83) = 0,108 \text{ A} \end{aligned} \quad (2.6.6)$$

kde l_j je délka jádra, l_s je délka spojky, N_1 je počet závitů.

$F_{m\delta}$ je magnetomotorické napětí ve vzduchové mezeře mezi přechody jednotlivých plechů.

$$F_{m\delta} = \frac{2 \cdot \delta}{\mu_0} \cdot \frac{B}{\sqrt{2}} = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{\mu_0} \cdot \frac{1,57}{\sqrt{2}} = 1,77 \text{ A} \quad (2.6.7)$$

kde δ je šířka vzduchové mezery

Indukované napětí:

$$\begin{aligned} U_i &= U_1 - \sqrt{(R_1 \cdot I_0)^2 + (X_{\sigma p} \cdot I_0)^2} = \\ &= 230 - \sqrt{1,09 \cdot 0,108)^2 + (0,02 \cdot 0,108)^2} = 229,88 \text{ V} \end{aligned} \quad (2.6.8)$$

Odpor železa:

$$R_{\text{Fe}} = \frac{U_i^2}{\Delta P_{\text{Fe}}} = \frac{229,88^2}{4,939} = 8741,4 \Omega \quad (2.6.9)$$

Výpočet ztrát je pomocí celkové váhy a měrných ztrát magnetického jádra, které byly zjištěny v grafu z měřených ztrátových charakteristik [6].

Z magnetizačního proudu a napětí U_1 můžeme vypočítat zdánlivý výkon naprázdno S_0 . Magnetizační proud I_m se dá zhruba považovat za proud naprázdno I_0 [3].

$$S_0 = U_1 \cdot I_m = 230 \cdot 0,108 = 24,76 \text{ VA} \quad (2.6.10)$$

Pro výpočet ztrát na prázdno P_0 je součet ztrát v magnetickém obvodu a joulových ztrát vinutí na prázdno.

$$P_0 = P_{\text{Fe}} + R_1 \cdot I_m^2 = 6,045 + 1,09 \cdot 0,108^2 = 6,06 \text{ W} \quad (2.6.11)$$

Z činných ztrát na prázdno si vypočítáme jalový výkon naprázdno Q_0 .

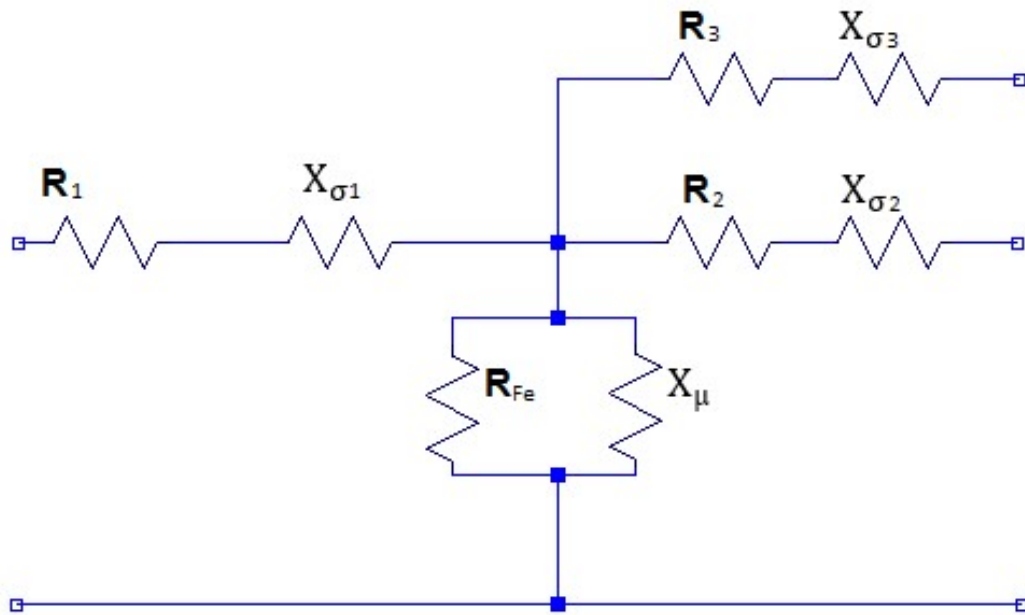
$$Q_0 = \sqrt{S_0^2 - P_0^2} = \sqrt{25,15^2 - 6,06^2} = 24,01 \text{ VAR} \quad (2.6.12)$$

Jalové ztráty na prázdno Q_0 jsou rozptýleny v magnetizačním jalovém výkonu Q_μ .

$$Q_\mu = Q_0 - X_{\text{sp}} \cdot I_m^2 = 24,41 - 0,02 \cdot 0,109^2 = 24,01 \text{ VAR} \quad (2.6.13)$$

A z té si můžeme vypočítat magnetizační reaktanci X_μ .

$$X_\mu = \frac{U_1^2}{Q_\mu} = \frac{230^2}{24,41} = 2203,5 \Omega \quad (2.6.14)$$



Obrázek 6: Náhradní schéma

2.7. Výpočet ztrát

2.7.1. Výpočet ztrát v železe

Rozměry byly dosazeny z Obrázek 3.

Výpočet objemu I plechu:

$$V_{sls} = f \cdot h \cdot c = 0,025 \cdot 0,051 \cdot 0,15 = 1,91 \cdot 10^{-4} m^3 \quad (2.7.1)$$

Výpočet prostředního sloupku E plechu:

$$V_{slp} = d \cdot h \cdot c = 0,05 \cdot 0,051 \cdot 0,075 = 1,91 \cdot 10^{-4} m^3 \quad (2.7.2)$$

Výpočet krajního sloupku E plechu:

$$V_{slk} = e \cdot h \cdot c = 0,025 \cdot 0,051 \cdot 0,075 = 0,956 \cdot 10^{-4} m^3 \quad (2.7.3)$$

Celkový objem transformátoru:

$$\begin{aligned} V_{Fe} &= V_{sls} + V_{slp} + V_{slk} = 1,91 + 1,91 + 0,956 = \\ &= 7,65 \cdot 10^{-4} m^3 \end{aligned} \quad (2.7.4)$$

Výpočet hmotnosti:

$$m_{fe} = \rho_{Fe} \cdot V_{Fe} = 7650 \cdot 7,65 \cdot 10^{-4} = 5,85 \text{ kg} \quad (2.7.5)$$

kde ρ_{Fe} je hustota železa v kg/m^3 [6].

Výpočet ztrát v železe:

$$\Delta P_{\text{Fe}} = m_{\text{Fe}} \cdot p_{16} = 5,85 \cdot 1,033 = 6,045 \text{ W} \quad (2.7.6)$$

2.7.2. Výpočet joulových ztrát

Výpočet ztrát vinutí při 20 °C.

Primárního vinutí:

$$\Delta P_{j1} = R_1 \cdot I_1^2 = 1,09 \cdot 2,1739^2 = 5,15 \text{ W} \quad (2.7.7)$$

Sekundárního vinutí:

$$\Delta P_{j2} = R_2 \cdot I_2^2 = 0,027 \cdot 10,4167^2 = 2,93 \text{ W} \quad (2.7.8)$$

Terciálního vinutí:

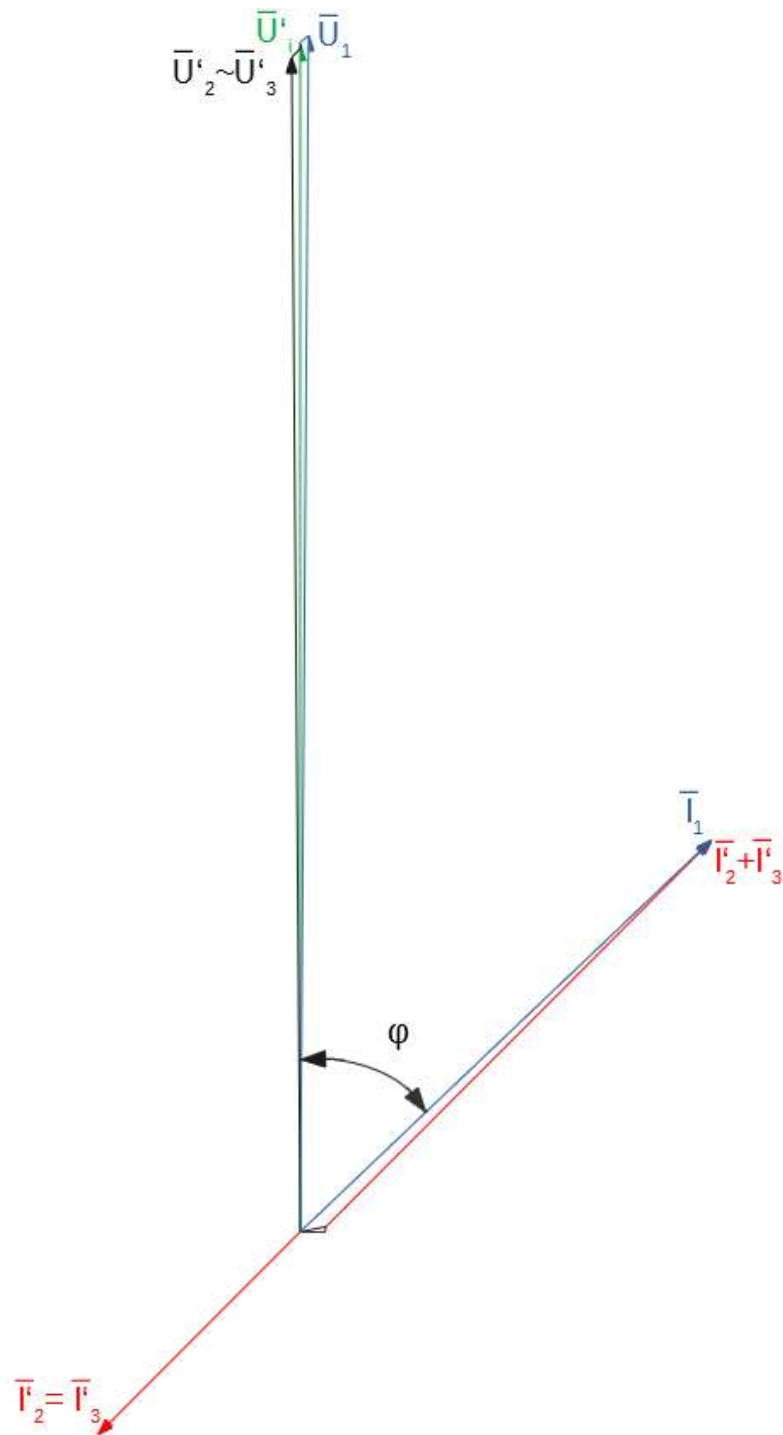
$$\Delta P_{j3} = R_3 \cdot I_2^2 = 0,0266 \cdot 10,4167^2 = 2,88 \text{ W} \quad (2.7.9)$$

Součet všech ztrát:

$$\Delta P_j = P_{j1} + P_{j2} + P_{j3} = 5,15 + 2,93 + 2,88 = 10,96 \text{ W} \quad (2.7.10)$$

2.8. Fázorový diagram

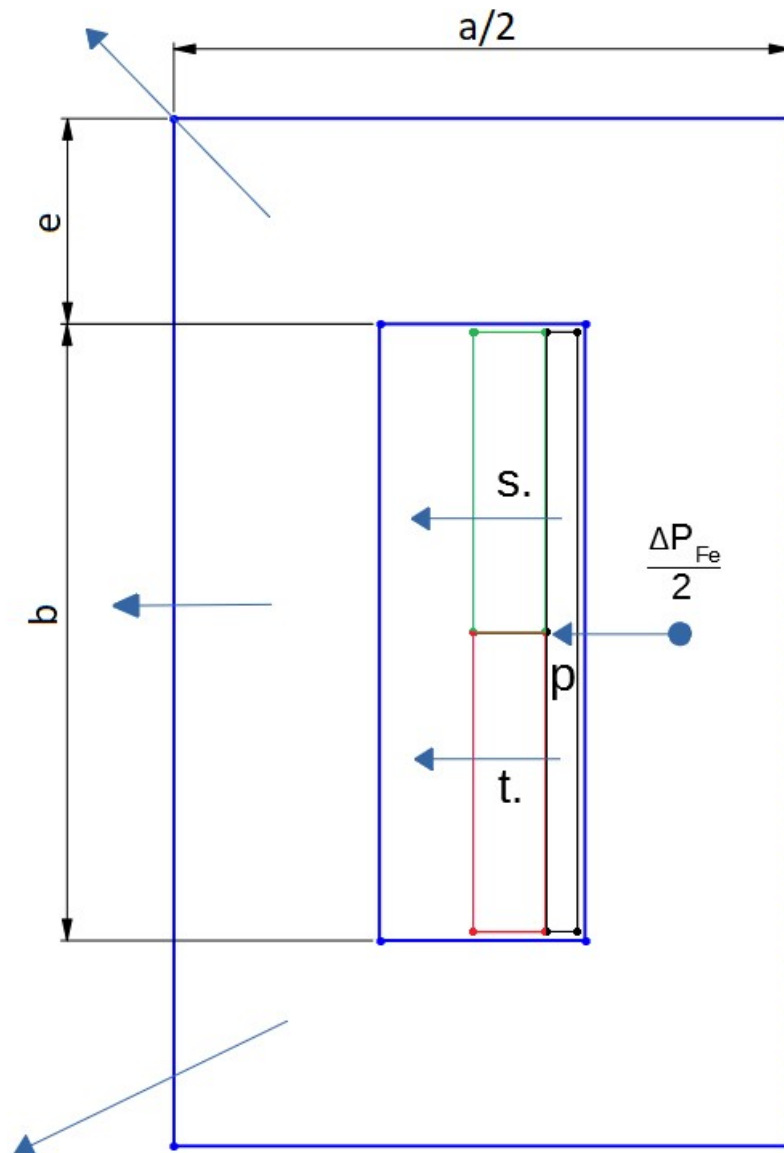
K výpočtu účinnosti je potřeba znát $\cos\varphi$, jelikož je zadaný zdánlivý výkon transformátoru. Ten lze získat z fázorového diagramu na obrázku 4. Měřítka pro nakreslení fázorového diagramu byla zvolena pro napětí $10\text{V} = 1 \text{ cm}$ a pro proudy $1\text{A} = 5 \text{ cm}$.



Obrázek 7: Fázorový diagram

Úhel mezi primárním napětím U_1 a proudem I_1 graficky vyšel $\varphi = 46^\circ 04'$ čemuž odpovídá účinníku $\cos\varphi = 0,69$. Grafické znázornění napětí U_2' a U_3' jsou si téměř totožné, protože se liší jen malým rozdílem odporů vinutí.

2.9. Oteplení



Oteplení probíhalo metodou tepelné sítě, kdy autor zjednodušil výpočet transformátoru na polovinu viz Příloha B–Výpočet oteplení. Autor přepočítal jednotlivé plochy železa a vinutí na ekvivalentní tepelné odpory R_t s určitou měrnou tepelnou vodivostí λ a součinitelem tepla α . Mezi jednotlivými segmenty transformátoru bylo uvažováno o přestupu tepla pouze vedením znázorněné šipkami. Jako zdroje tepla jsou ztráty v železném jádře $\frac{\Delta P_{Fe}}{2}$, ve všech třech vinutích jsou ztráty joulové $\frac{\Delta P_j}{2}$ a všechny ztráty jsou poděleny dvěma, kvůli zjednodušenému tepelnému schématu. Celková teplota při trvalém zatížení vyšla $62,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Při realizaci izolace vinutí se tedy můžeme odkazovat na tepelnou třídu Y. Pod touto tepelnou třídou si můžeme představit materiály organické nebo neimpregnované (papír, bavlna,

hedvábí) [5,7].

Při znalosti oteplení transformátoru si můžeme vypočítat změnu odporu:

$$R_1 = R_0 \cdot \frac{235 + T_1}{235 + T_0} = 1,09 \cdot \frac{235 + 62,3}{235 + 20} = 1,27 \, \Omega \quad (2.9.1)$$

kde R_1 je odpor primárního vinutí při teplotě 62,3 °C

R_0 je odpor primárního vinutí při teplotě 20 °C.

T_1 je konečná teplota

T_0 je počáteční teplota

$$R_2 = R_{02} \cdot \frac{235 + T_1}{235 + T_0} = 0,027 \cdot \frac{235 + 62,3}{235 + 20} = 0,0315 \, \Omega \quad (2.9.2)$$

kde R_2 je odpor sekundárního vinutí při teplotě 62,3 °C

R_{02} je odpor sekundárního vinutí při teplotě 20 °C

$$R_3 = R_{03} \cdot \frac{235 + T_1}{235 + T_0} = 0,0266 \cdot \frac{235 + 62,3}{235 + 20} = 0,0303 \, \Omega \quad (2.9.3)$$

kde R_3 je odpor sekundárního vinutí při teplotě 62,3 °C

R_{03} je odpor sekundárního vinutí při teplotě 20 °C

Výpočet ztrát pro vinutí při 62,3 °C:

Primárního vinutí:

$$\Delta P_{j1} = R_1 \cdot I_1^2 = 1,27 \cdot 2,1739^2 = 6 \, \text{W} \quad (2.9.4)$$

Sekundárního vinutí:

$$\Delta P_{j2} = R_2 \cdot I_2^2 = 0,0315 \cdot 10,4167^2 = 3,42 \, \text{W} \quad (2.9.5)$$

Terciálního vinutí:

$$\Delta P_{j3} = R_3 \cdot I_2^2 = 0,0303 \cdot 10,4167^2 = 3,55 \, \text{W} \quad (2.9.6)$$

Součet všech ztrát:

$$\Delta P_j = P_{j1} + P_{j2} + P_{j3} = 6 + 3,42 + 3,55 = 12,97 \, \text{W} \quad (2.9.7)$$

2.10. Výpočet účinnosti

2.10.1. Celkové ztráty

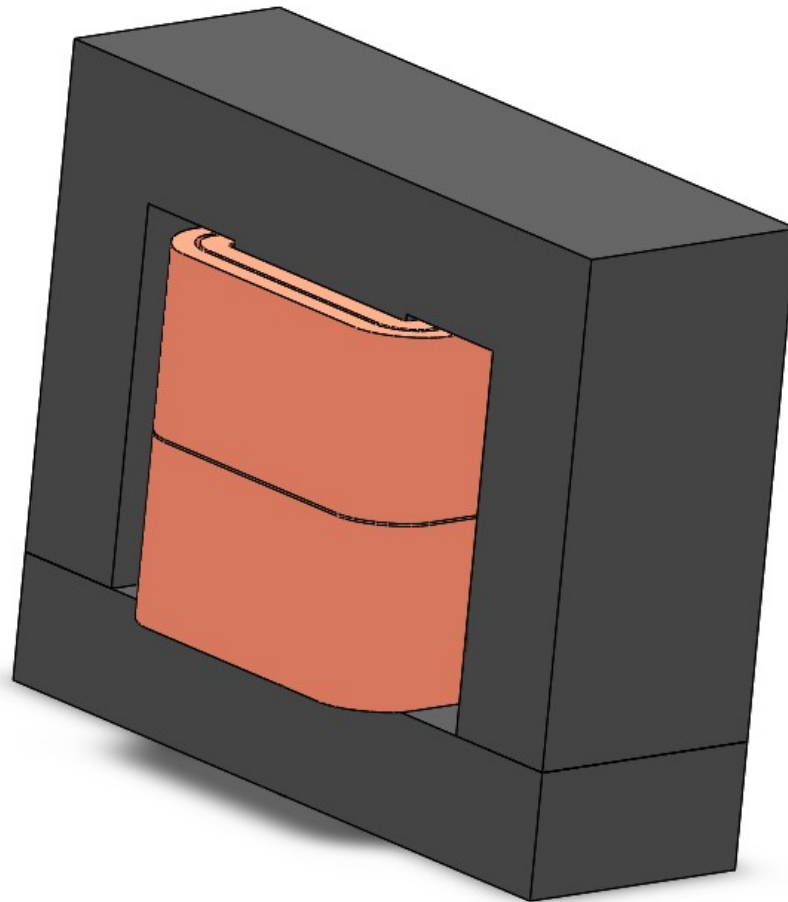
Jsou součtem joulových ztrát vinutí při teplotě 62,3 °C a ztrát v železe z rovnice (2.7.6).

$$\Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_j = 6,045 + 12,97 = 19,02 \text{ W} \quad (2.10.1)$$

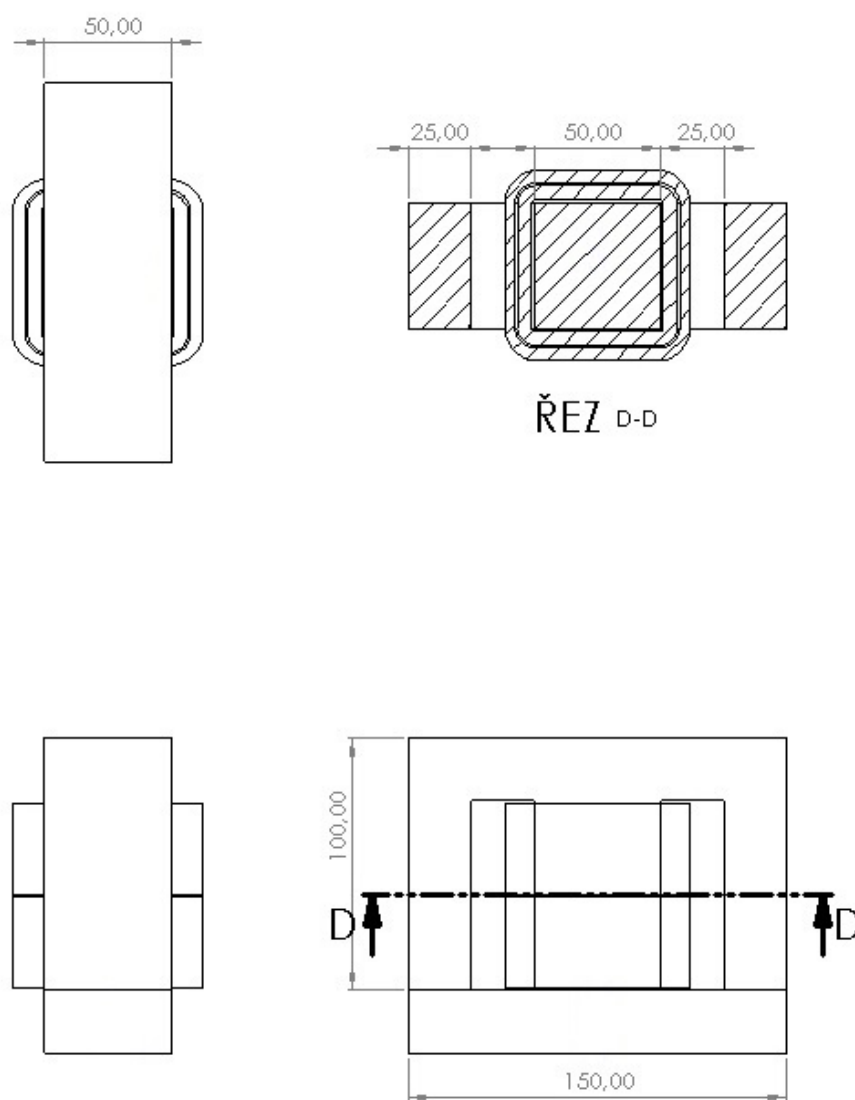
$$\eta = \frac{S \cdot \cos\varphi - \Delta P}{S \cdot \cos\varphi} = \frac{500 \cdot 0,69 - 19,02}{500 \cdot 0,69} = 0,9486 \quad (2.10.2)$$

2.11. Rozměrový výkres

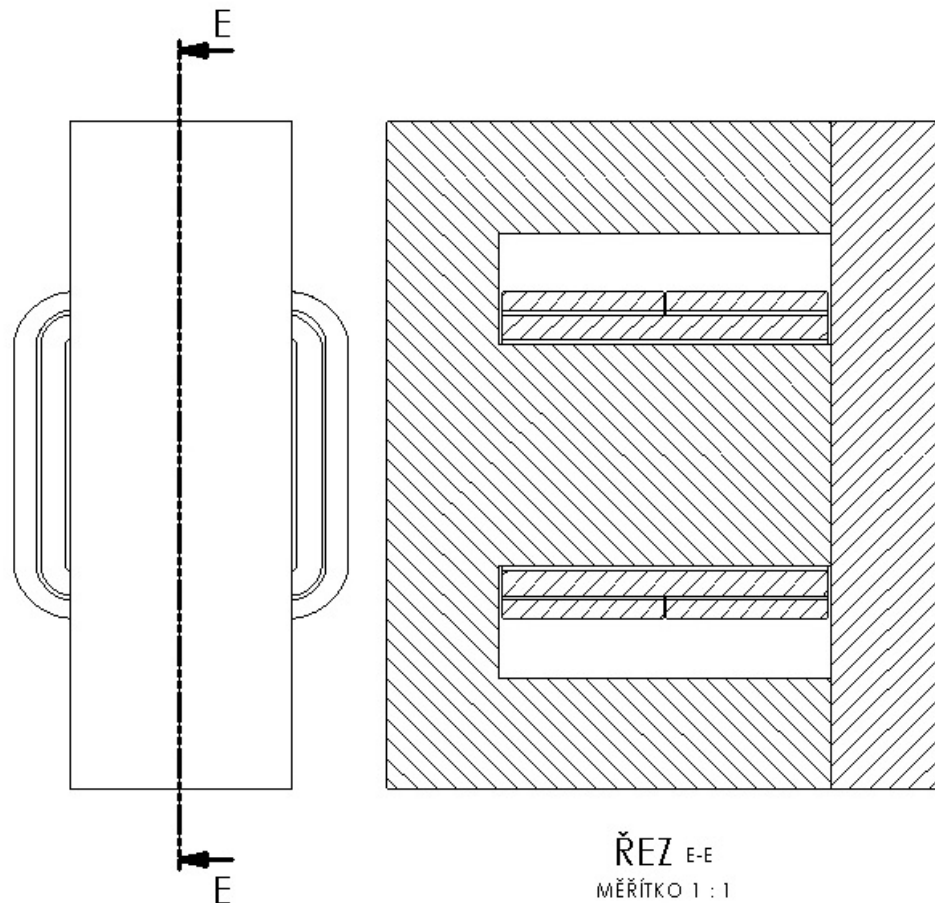
Na Obrázek 8 můžeme vidět celkový výkres zhotoveného transformátoru.



Obrázek 8: Celý transformátor



Obrázek 9: Rozměrový výkres transformátoru



Obrázek 10: Řez transformátorem

3. Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků byla provedena pomocí volně dostupného programu Femm. Pro vyřešení magnetického pole byl použit celý magnetického obvodu transformátoru, souřadnicový systém byl použit planární. Měřítko bodů bylo nastaveno v centimetrech. Řešeno pro 50 Hz Newtonovou metodou.

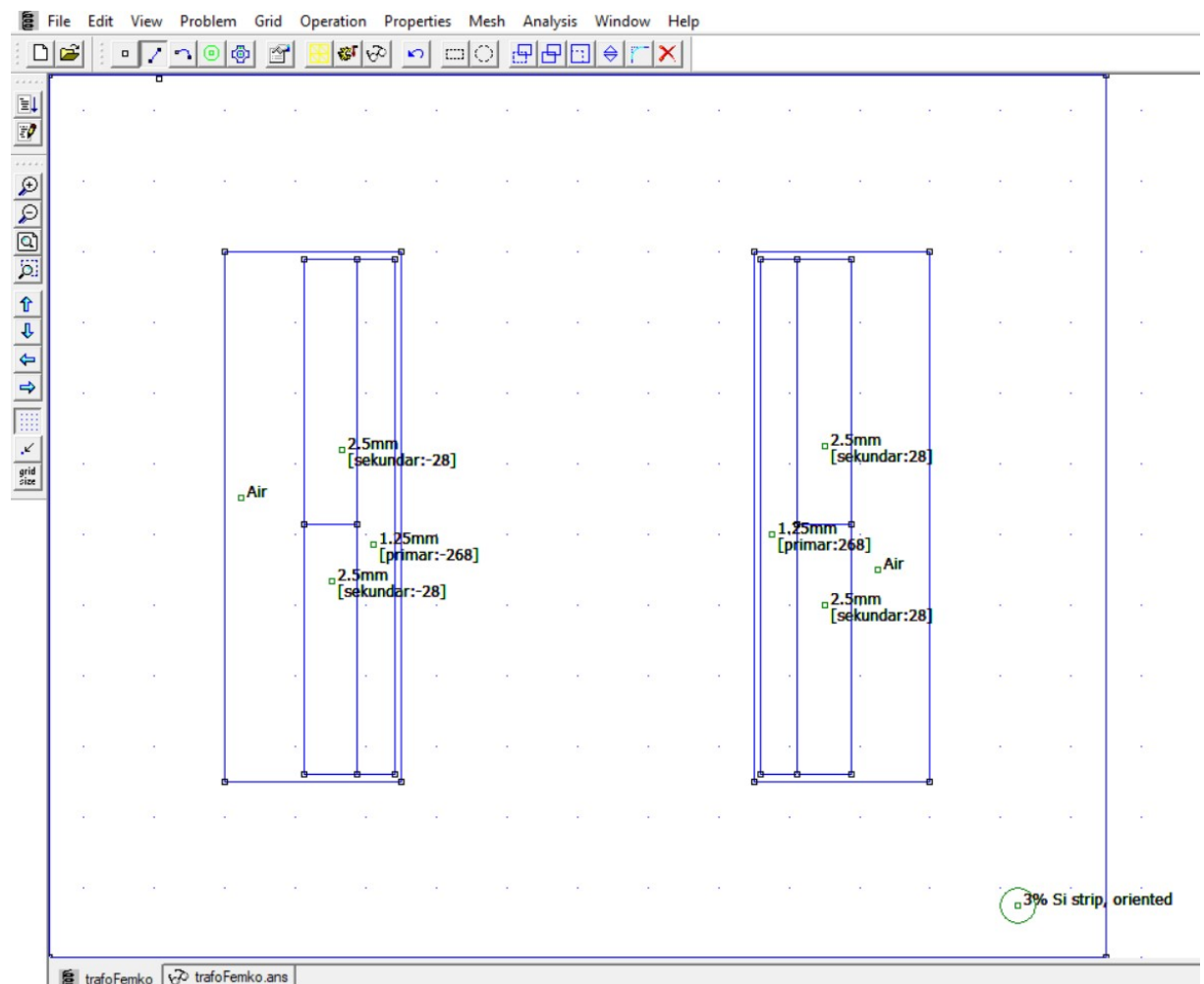
Materiály byly vybrány pro vodiče měď z knihovny programu, pro primární vinutí vodiče o průměru $d_1 = 1,25$ mm s počty závitů $N_1 = 268$, pro sekundární a terciální o průměru $d_2 = d_3 = 2,5$ mm, o závitěch $N_2 = N_3 = 28$. Pro všechna vinutí byla zadána relativní permeabilita $\mu_r = 1$ a měrná vodivost $\rho = 58$ MS/m. Pro magnetický obvod byl vybrán magnetický materiál o nelineární magnetizační charakteristice zadaná z Graf 1: Magnetizační křivka a bylo zadáno do programu, že se jedná o plechy o tloušťce 0,35 mm s koeficientem plnění $k_{Fe} = 0,97$. Pro vzduch bylo zadáno relativní permeabilita $\mu_r = 1$ a měrná vodivost $\rho = 0$ MS/m.

Okrajové podmínky byly zadány jako magnetický potenciál $A = 0$ a umístěny na okraje magnetického obvodu.

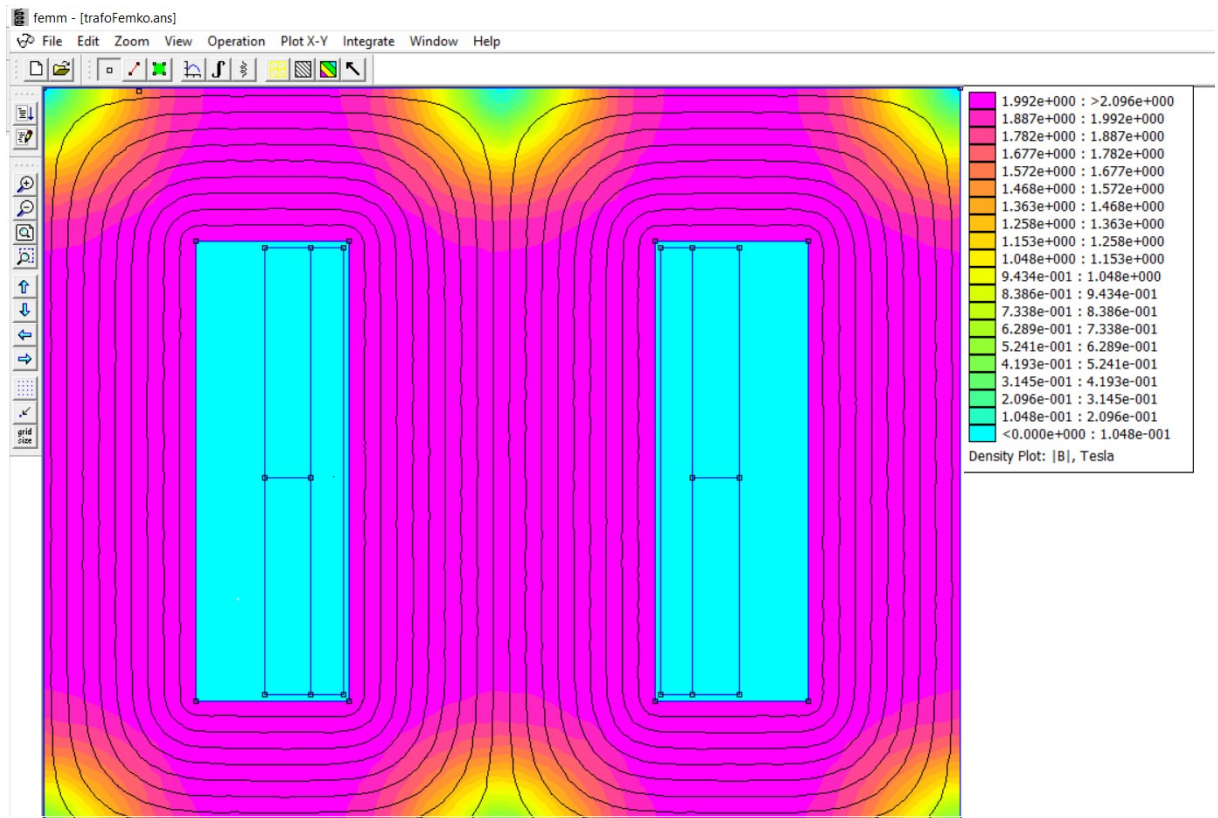
Proud v primárním vinutí byl zadán naprázdno $I_m = 0,108 A$ z rovnice (2.6.6), v sekundárním a terciálním vinutí je proud nulový, transformátor je v chodu na prázdno.

Na Obrázek 11 je vidět rozměrový výkres s nastaveným vinutím a magnetickým obvodem. Na Obrázek 12 je vidět rozložení magnetické indukce a Graf 2 nám ukazuje závislost magnetické indukce v závislosti na šířce prostředního sloupku.

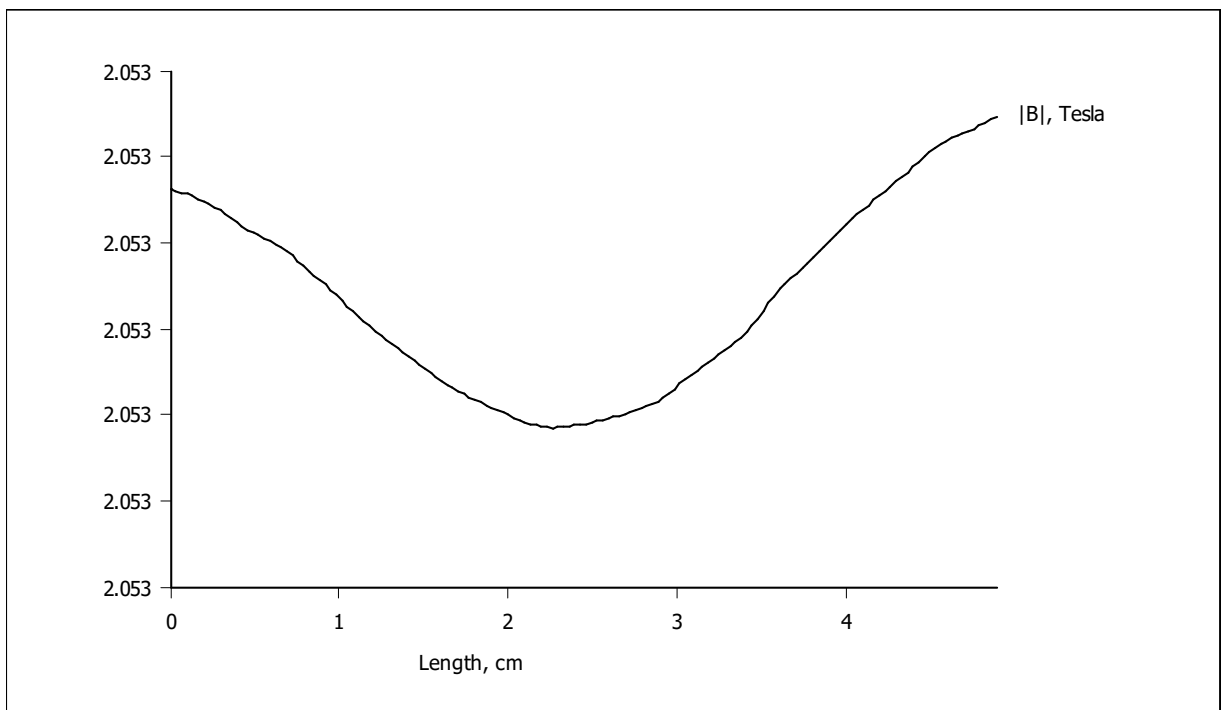
Výsledkem této simulace je rozložení indukce v magnetickém obvodu. V prostředním sloupku je magnetická indukce $B = 2,053 T$. Toto lze vidět na Grafu 2. Vlivem chodu naprázdno se simulovaný magnetický obvod přebuzen.



Obrázek 11: Magnetický obvod s vinutím



Obrázek 12: Magnetická indukce v železe



Graf 2: Magnetická indukce v jádře

Závěr

Návrh transformátoru byl zhotoven co nejjednodušeji při použití technických norem a známých vzorců. Autor začal výpočtem pro celkový průřez magnetického jádra, který vyšel $S = 0,0023 \text{ m}^2$. Uvedený průřez je brán jako doporučený. K dalším výpočtům jsou použity normy pro rozměry magnetického jádra a kostru transformátoru. U normy pro kostru je dán i hloubka $h = 51 \text{ mm}$, čím se samostatné zvolení průřezu magnetického jádra zjednodušilo. Po vypočtení a zvolení si rozměrů magnetického jádra, na které se navijí vinutí, se přešlo k samotnému výpočtu prvků, které jsou součástí náhradního schématu. Jsou jimi odpory primárního, sekundárního, terciálního a rozptylové reaktance primárního, sekundárního a terciálního vinutí. K výpočtu odporu byla využita znalost rezistivity mědi $\rho = 0,01789 \mu\Omega\text{m}$ z literatury, autor vypočítal celkovou délku vinutí dle rozměrů kostry a průřez vodiče dle zvolené proudové hustoty $J = 2,5 \text{ A/mm}^2$. Proudovou hustotu přepočítal, když musel celkový průměr zvětšit podle příslušné normy. Jednotlivé odpory vyšly $R_1 = 1,09 \Omega$ pro primární vinutí, $R_2 = 0,027 \Omega$ pro sekundární vinutí a $R_3 = 0,0266 \Omega$ pro terciální vinutí. Sekundární a terciální vinutí mají rozdílné odpory z důvodu rozdílné délky vodičů zapříčiněné počtem závitů primárního vinutí. Poslední řada primárního vinutí obsahuje pouze 16 závitů. Přepočítané odpory jsou pro teplotu $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

U výpočtu rozptylové reaktance autor vycházel z [7], kde měl zjednodušeně vysvětlený odvozený vzorec pro rozptylovou reaktanci podél v oknech transformátoru složeného z EI plechů. Jednotlivé reaktance vyšly $X_{\sigma p} = 0,02 \Omega$ pro primární vinutí, $X_{\sigma s, 2} = 0,264 \text{ m}\Omega$ pro sekundární a terciální vinutí. Pro sekundární a terciální vinutí je to společná hodnota, která musí být ještě přepočítána jako paralelní kombinace dle náhradního schéma.

Pro výpočet účinnosti je potřeba znalosti účinníku, se kterým transformátor pracuj. K tomu bylo potřeba fázorový diagram. Pomocí grafického součtu primárního, sekundárního, terciálního a magnetizačního proudu a součtem sekundárního, terciálního, indukovaného napětí a úbytků napětí lze zjistit úhel φ mezi primárním napětím \bar{U}_1 a primárním proudem \bar{I}_1 .

Joulové ztráty vyšly pro primární vinutí $\Delta P_{j1} = 5,15 \text{ W}$, pro sekundární vinutí $\Delta P_{j2} = 2,93 \text{ W}$ a pro terciální vinutí $\Delta P_j = 2,88 \text{ W}$. To vše při teplotě 20°C . Ztráty v železe vyšly $\Delta P_{Fe} = 6,045 \text{ W}$.

Při znalosti všech ztrát se mohlo vypočítat oteplení transformátoru. Celý transformátor je zjednodušen na osově souměrný a jsou přepočítány jednotlivé prvky na tepelné odpory. Celková teplota vyšla $T = 63,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro výpočet oteplení autor vycházel z velké části z [7].

Při znalosti teploty transformátoru jsou přepočítány odpory vinutí, kde $R_1 = 1,27 \Omega$,

$R_2 = 0,0315 \Omega$ a $R_3 = 0,0303 \Omega$. Z jich přepočítaných odporů jsou vypočítány ztráty ve vinutí kde pro primární $\Delta P_{j1} = 6 W$, pro sekundární $\Delta P_{j2} = 3,42 W$ a pro terciální $\Delta P_{j3} = 3,55 W$. Součtem těchto tří ztrát a ztrát v železe vyšly celkové ztráty transformátoru $\Delta P = 19,02 W$.

Výpočet účinnosti vyšel $\eta = 0,9486$.

Kontrola, která byla realizovaná programem FEMM a byla kontrolována magnetická indukce ve středním sloupku vyšla $B = 2,053 T$. Tato indukce odpovídá chybě 23,52 %.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] G. N. Petrov, *Elektrické stroje 1, Úvod-transformátory*, Academia, Československá akademie věd, Praha 1980
- [2] E. Majling, *Transformátor – základní vlastnosti a dělení*, [online], 2015, [30.5.2019] – dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/transformator-zakladni-VLASTNOSTI-A-DELENI/>
- [3] Z. Faktor, *Transformátory a cívky*, Nakladatelství BEN - technická literatura, Praha 1999, ISBN 80-86056-49-X
- [4] M. Patočka, *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektrotechnice, měřící technice a silnoproudé elektrotechnice*, VUT Brno/Nakladatelství VUTIUM 2011
- [5] J. Červený, *Stavba strojů (Materiály pro přednášky)*, Západočeská univerzita, 2012
- [6] Catalogue, Grain oriented electrical steel, *Cogentpower*, [online] www.cogent-power.com – dostupné z: <https://cogent-power.com/downloads>
- [7] M. Skalický, *Zpracování teplotního modelu synchronního stroje s PM v prostředí matlab (Bakalářská práce)*, Západočeská univerzita, Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky, 2018, Ing. Lukáš Veg
- [8] J. Šobra, U. Aydin, *Design of Double Secondary Winding Transformer*, 2015

Seznam norem

- | | | |
|-----|------------------|------------------------------|
| (1) | ČSN EN 60740–1 | Rozměry pro magnetické jádro |
| (2) | ČSN EN 61797–1 | Kostra pro transformátory |
| (3) | ČSN EN 60317-0-1 | Smaltované vodiče |
| (4) | ČSN EN 10107 | Orientované plechy |

Přílohy

Příloha A – Výpočet transformátoru

```

%Vypocetmagnetickeho obvodu
rofj=7600; %hustota zeleza
a=0.050; %rozmerprostredniho sloupku
h=0.050; %tloustkajadra
c=0.025; %krajni sloupky
ltr=0.150; %delka trafa
kcu=0.3; %koeficient plnenimedi
kfe=0.96; %koeficient plenizeleza
f=50; %frekvence
J=2.5; %A/mm proudova hustota dl faktora
ny=0.9; %ucinnost co ma vyjit
Szad=500; %VA zadanyvykon
mi0=4*pi*10^-7; %permeabilita vakua
H=5000; %intenzita mag pole A/m
omega=2*pi*f; %uhlova rychlost
B=1.6; %indukce
ro=0.01789; %mernareztivitamedipri 20 C mikroOhm/m
S=a*h; %obsah jadra
ocas=1; %1 - 1,1 cinitel zahrnující zvyseni realne slozky proudu
dodatečnými ztratami
pm15=2.7; %W/kg merneztraty z normy, plechy M270-50A
m=1; %pocet fazi
E1=230; %hodnota napeti primaru
E2=24; %hodnota napeti sekundaru
E3=24; %hodnota napeti tercialem

Strafa=((4*sqrt(2)*Szad)/(3*pi*kcu*kfe*f*B*J*10^6))^(1/2) %minimalni plocha
mag. obvodu v m

Bkont=E1/(4.44*f*266*S*kfe)
B=Bkont; %indukce po kontrole

Vsl=c*h*ltr; %objem spodniho sloupku
Vsl2=a*a*a; %objem prostredniho sloupku
Vsl3=c*h*a; %objem krajnich sloupku
Vzel=2*Vsl+Vsl2+2*Vsl3; %celkovy objem zeleza
mfe=rofj*Vzel; %hmotnost zeleza

ls=0.050; %delka spojky
lj=0.075; %delka hl. jadra
lcelk=0.2785; %z normy
delta=0.00004; %mista styku
pm16=pm15*B^2*(f/50)^(1.3);

k=E1/E2 %prevod trafa
U1v=4.44*1*B*S*f; %Voltu na 1 zaviti
N2=E2/U1v; %pocet zavitu
N2=27; %pocet zavitu sekundar zaokrouhleny
N1=N2*E1/E2;
N1=259;

kkontr=N1/N2 %prevod pres zaviti
Sjadr=E1/(4.44*N1*B*f);

I1=Szad/E1; %proud primarem

```

```

I2=(Szad/2)/E2;          %proud sekundarem
I3=(Szad/2)/E3;          %proud tercialem
d1=sqrt((4*I1)/(J*pi));  %prumer vodice v mm pri J=2.5A/mm
d1=1.12;                 %mm
d2=sqrt((4*I2)/(J*pi));  %prumervodice mm sekund
d2=2.5;
d3=sqrt((4*I3)/(J*pi));  %prumer vodice terciálu
d3=2.5;
kkontr2=(I2+I3)/I1

%Odpor vinuti
%ozel=4*h;                %obsah zelezai
dizol=1;                  %prumer izolace
dli=d1+0.034;             %izolovany vodice
d2i=d2+0.042;
d3i=d3+0.042;
rstr1=dli/2;
rstr2=d2i/2;
rstr3=d3i/2;

l11=63*(2*a*10^3+2*h*10^3+2*pi*(rstr1+dizol)); %delka kolem
sloupku vodice
l12=63*(2*a*10^3+2*h*10^3+2*pi*(rstr1+dli+dizol)); %delka kolem sloupku
vodice
l13=63*(2*a*10^3+2*h*10^3+2*pi*(rstr1+2*dli+dizol)); %delka kolem
sloupku vodice
l14=63*(2*a*10^3+2*h*10^3+2*pi*(rstr1+3*dli+dizol)); %delka kolem
sloupku vodice
l15=6*(2*a*10^3+2*h*10^3+2*pi*(rstr1+4*dli+dizol)); %delka kolem
sloupku vodice
%l16=38*(2*a*10^3+2*h*10^3+2*pi*(rstr1+5*dli+dizol));

lvod=(l11+l12+l13+l14+l15)*10^-3; %celková délka vodice primáru v m

%sekundar
l21=3*(2*a*10^3+2*h*10^3+2*pi*(rstr2+5*dli+rstr1+dizol));
l22=9*(2*a*10^3+2*h*10^3+2*pi*(rstr2+4*dli+rstr1+dizol));
l23=3*(2*a*10^3+2*h*10^3+2*pi*(rstr2+5*dli+rstr1+d2i+dizol));
l24=9*(2*a*10^3+2*h*10^3+2*pi*(rstr2+4*dli+rstr1+d2i+dizol));
l25=3*(2*a*10^3+2*h*10^3+2*pi*(rstr2+5*dli+rstr1+2*d2i+dizol));

lvod2=(l21+l22+l23+l24+l25)*10^-3; %v metrech

%tercial
%l31=6*(2*a*10^3+2*h*10^3+2*pi*(rstr2+5*dli+rstr1+dizol));
l32=12*(2*a*10^3+2*h*10^3+2*pi*(rstr2+4*dli+rstr1+dizol));
%l33=6*(2*a*10^3+2*h*10^3+2*pi*(rstr2+5*dli+rstr1+d2i+dizol));
l34=12*(2*a*10^3+2*h*10^3+2*pi*(rstr2+4*dli+rstr1+d2i+dizol));
%l35=6*(2*a*10^3+2*h*10^3+2*pi*(rstr2+5*dli+rstr1+2*d2i+dizol));
l36=3*(2*a*10^3+2*h*10^3+2*pi*(rstr2+4*dli+rstr1+2*d2i+dizol));

lvod3=(l32+l34+l36)*10^-3; %v metrech

Svod1=(pi*(d1/2*10^-3)^2); %prurez vodice v m
Svod2=(pi*(d2/2*10^-3)^2); %prurez vodice v m

R1c=ro*lvod/Svod1; %odpor vodice primar mikroOhm
R2c=ro*lvod2/(Svod2); %odpor vodice sekund mikroOhm
R3c=ro*lvod3/(Svod2); %odpor vodice tergalu mikroOhm

```

```

l1zav=(2*a*10^3+2*h*10^3+2*pi*(rstr1+dizol))*1e-3; %delka 1 zavitu primaru
l2zav=(2*a*10^3+2*h*10^3+2*pi*(rstr2+5*dli+rstr1+dizol))*1e-3; %delka 1
zavitu sekundaru

kappa=(pi*h)/(((5*dli*10^-3+4*dli*10^-3)/2+3*d2i*10^-3)+a+((5*dli*10^-
3+4*dli*10^-3)/2+3*d2i*10^-3));
lamdax=kappa/(kappa-1+exp(-kappa)); %korekcni faktor

Xsigp=omega*mi0*(l1zav/(lamdax*ls))*N1^2*(a*(((5*dli*10^-3+4*dli*10^-
3)/2+3*d2i*10^-3)+((5*dli*10^-3+4*dli*10^-3)/2+3*d2i*10^-3))/3));
%reaktance primaru

Xsigsl=omega*mi0*(l2zav/(lamdax*ls))*N2^2*(a*(((5*dli*10^-3+4*dli*10^-
3)/2+3*d2i*10^-3)+((5*dli*10^-3+4*dli*10^-3)/2+3*d2i*10^-3))/3));
%reaktance sekundaru a terciálu

deltaPfe=pm16*mfe; %ztraty v zezele

Rfe=E1^2/deltaPfe; %magneticky odpor

Imi=[6.13,0];
Ife=[0,0.144];
Im=(1/N1)*(3*lj*H+2*ls*H); %magneticky proud
S0=E1*Im; %zdanli vyvykon z mereni naprazdno
P0=deltaPfe+(R1c*10^-6)*Im^2; %cinny vykon naprazdno

Q0=sqrt(S0^2-P0^2); %jalovy vykon naprazdno
%Q0=10794;
Qm=Q0-Xsigp*Im;
Xm=E1^2/Qm;

%Ztraty
%deltaPfe=Rfe*ia0^2; %W ztraty v zezele S0
deltaPj1=(R1c*10^-6)*I1^2; %ztraty ve vinuti prim
deltaPj2=(R2c*10^-6)*I2^2; %ztraty ve vinuti sek.
deltaPj3=(R3c*10^-6)*I3^2; %ztraty ve vinuti terc.
deltaPj=deltaPj1+deltaPj2+deltaPj3; %W celkove ztraty vinuti
deltaP=deltaPfe+deltaPj; %celkoveztraty

cosfi=cos((deltaPfe+R1c*Im^2)/(E1*Im))
nyk=(499.94-deltaP)/(499.94) %kontrolni ucinost

```

Příloha B–Výpočet oteplení

```

S=0.00255;
h_p=73e-3;
h_s1=36.5e-3;
h_s2=36.5e-3;
b_p=5.04e-3;
b_s1=5e-3;
b_s2=5e-3;
b_kostr=1e-3;
b_izolace=1e-3;
b_izolace2=5e-3;
h_izolace2=1e-3;
b=25e-3;
e=51e-3;
a=50e-3;
h=75e-3;
Obv_s=241.25e-3;

```

```

d_cu_p=1.12e-3;
b_iz_vod_p=0.034e-3;
d_cu_s1=2.5e-3;
b_iz_vod_s1=0.042e-3;
d_cu_s2=2.5e-3;
b_iz_vod_s2=0.042e-3;

deltaP_fe=6.045;
deltaP_p=5.15;
deltaP_s1=2.93;
deltaP_s2=2.88;

lambda_fe_pod=40;
lambda_fe_pri=0.6;
lambda_kostr=0.3;
lambda_izolace=0.3;
lambda_cu=394;
lambda_iz_vod=0.2;
alpha=13;
tep0=40;
r_fe=sqrt(S/pi);
r_p=r_fe+b_kostr+b_p/2;
r_s=r_p+b_p/2+b_izolace+b_s1/2;

lambda_ekv_p=(0.884*d_cu_p+b_iz_vod_p)/((0.884*d_cu_p)/(lambda_cu)+(b_iz_vod_p)/(lambda_iz_vod));
lambda_ekv_s1=(0.884*d_cu_s1+b_iz_vod_s1)/((0.884*d_cu_s1)/(lambda_cu)+(b_iz_vod_s1)/(lambda_iz_vod));
lambda_ekv_s2=(0.884*d_cu_s2+b_iz_vod_s2)/((0.884*d_cu_s2)/(lambda_cu)+(b_iz_vod_s2)/(lambda_iz_vod));

R=zeros(5);
P=zeros(5);
M=zeros(4);
B=zeros(4,1);
R(1,2)=(r_fe)/(lambda_fe_pod*(pi*r_fe/2)*h_p)+(b_kostr)/(lambda_kostr*(pi*(r_fe+b_kostr/2)*h_p)+(b_p/2)/(lambda_ekv_p*(pi*(r_fe+b_kostr+b_p/4)*h_p)));
R(2,3)=(b_p/2)/(lambda_ekv_p*(pi*r_p*h_s1))*(b_izolace)/(lambda_izolace*(pi*(r_p+b_izolace/2)*h_s1)+(b_s1/2)/(lambda_ekv_s1*(pi*(r_p+b_izolace+b_s1/4)*h_s1)));
R(2,4)=(b_p/2)/(lambda_ekv_p*(pi*r_p*h_s2))*(b_izolace)/(lambda_izolace*(pi*(r_p+b_izolace/2)*h_s2)+(b_s2/2)/(lambda_ekv_s2*(pi*(r_p+b_izolace+b_s2/4)*h_s2)));
R(3,4)=(h_s1/2)/(lambda_ekv_s1*(b_s1*pi*r_s)+(h_izolace2)/(lambda_izolace*(b_izolace2*pi*r_s)))+(h_s2/2)/(lambda_ekv_s2*(b_s2*pi*r_s));
R(3,5)=(b_s1/2)/(lambda_ekv_s1*(pi*(r_s+b_s1/4)*h_s1))+1/(alpha*Obv_s/2*h_s1);
R(4,5)=(b_s2/2)/(lambda_ekv_s2*(pi*(r_s+b_s2/4)*h_s2))+1/(alpha*Obv_s/2*h_s2);
R1=(b/2)/(lambda_fe_pod*e*(2*b+h*a));
R2=(e/4)/(lambda_fe_pri*b*(2*b+h*a));
R(1,5)=(R1*R2)/(R1+R2)+(1/(alpha*(2*e*(2*b+a/2)+e*h+(b*b*4+b*a+b*h)*2)));

P(1)=deltaP_fe/2;
P(2)=deltaP_p/2;
P(3)=deltaP_s1/2;
P(4)=deltaP_s2/2;

for i=1:5
for j=1:5

```

```
if R(i,j)~=0
    R(j,i)=R(i,j);
end
end
end
for i=1:4% vyplneni matice
for j=1:5
if j<5
if R(i,j)~=0
    M(i,i)=M(i,i)+1/(R(i,j));%vyplnenidiagonaly
end
if R(i,j)~=0
    M(i,j)=-1/(R(i,j));%ostatni prvky
end
else
if R(i,j)~=0
    M(i,i)=M(i,i)+1/(R(i,j));%pricteniprestupu do okoli do
diagonaly
end
end
end
end
for i=1:4
if R(5,i)~=0
    B(i)=(tep0/R(5,i)+P(i));
else
    B(i)=P(i);
end
end
M
B
tep=M\B
```