

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Magnetické pole transformátoru

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

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

Jméno a příjmení: **Jan MAŇHAL**
Osobní číslo: **E09B0154P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Magnetické pole transformátoru**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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


1. Popište princip a funkci transformátoru.
2. Uveďte základní rovnice a popište náhradní schéma transformátoru.
3. Vytvořte 2D model magnetického pole transformátoru.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


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

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lukáš Bouzek**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**


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




Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Hlavním tématem bakalářské práce je zaměření na magnetické pole transformátoru. Výsledkem práce je 2D model reálného univerzitního transformátoru, na kterém jsou modelovány stavy podle předešlého měření.

Klíčová slova

Transformátor, náhradní schéma transformátoru, magnetické pole transformátoru, 2D model transformátoru, rovnice transformátoru, magnetické pole, magnetický tok, matematické modelování.

Abstract

The main topic of this thesis is to focus on the magnetic field of the transformer. The result is a 2D model of a real university transformer, where the states are modeled by previous measurements.

Key words

Transformer, the transformer equivalent circuit, the magnetic field of the transformer, the transformer 2D model, equation transformers, magnetic field, magnetic flux, mathematical modeling.

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 6.6.2013

Jan Maňhal

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Bouzkoviza cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Poděkování si zaslouží i Ing. Vladimír Kindl Ph.D. za pomoc a rady s počítačovým modelováním. Dále bych rád poděkoval rodičům za umožněné studium a jejich mimořádnou trpělivost během mého studia.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD.....	10
1 TRANSFORMÁTOR.....	11
1.1 PRINCIP TRANSFORMÁTORU.....	12
1.2 NÁHRADNÍ SCHÉMA IDEÁLNÍHO TRANSFORMÁTORU	14
1.3 NÁHRADNÍ SCHÉMA REÁLNÉHO TRANSFORMÁTORU	14
1.4 TRANSFORMÁTOR NAPRÁZDNO	16
1.5 TRANSFORMÁTOR NAKRÁTKO	17
1.6 TROJFÁZOVÉ TRANSFORMÁTORY.....	18
2 MAGNETICKÝ OBVOD TRANSFORMÁTORU	20
2.1 DĚLENÍ KONSTRUKCE MAGNETICKÉHO OBVODU	20
2.2 KONSTRUKCE MAGNETICKÉHO OBVODU TRANSFORMÁTORU.....	21
2.3 TRANSFORMÁTOROVÉ PLECHY	22
2.4 TVARY TRANSFORMÁTOROVÝCH PLECHŮ A JEJICH SKLÁDÁNÍ	25
3 MODELOVÁNÍ MAGNETICKÉHO POLE	27
3.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	27
3.2 MODELOVÝ TRANSFORMÁTOR TNC F 3256-0058	29
3.3 POSTUP MODELOVÁNÍ	30
3.3.1 Pre-procesing	31
3.3.2 Solution.....	34
3.3.3 Post-procesing.....	34
4 VÝSLEDKY MODELOVÁNÍ	35
4.1 STAV - NAPRÁZDNO.....	35
4.2 STAV – ŽÁROVKA NESVÍTÍ.....	37
4.3 STAV – ŽÁROVKA SVÍTÍ.....	38
ZÁVĚR	40
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	41
PŘÍLOHY	42

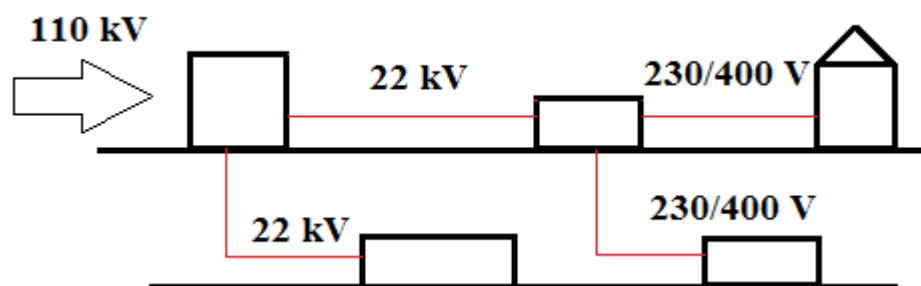
Seznam symbolů a zkratek

NN.....	nízké napětí
VN.....	vysoké napětí
VVN.....	velmi vysoké napětí
V, mV, μ V	napětí [V]
$X_{1\sigma}$, $X_{2\sigma}$	reaktance
W	Watt
Φ_1 , Φ_2	magnetický tok
N_1 , N_2	počet závitů
p_1	ztrátové číslo elektrotech. plechu
L.....	indukčnost[H]
Z.....	impedance[Ohm]
k	převod transformátoru
I.....	proud[A]
R.....	odpor[Ohm]
Y(y).....	zapojení transformátoru od hvězdy
D(d).....	zapojení transformátoru do trojúhelníka
Z(z).....	zapojení transformátoru do lomené hvězdy
T.....	Tesla
B.....	indukce
J.....	proudová hustota

Úvod

Transformátor je netočivý elektrický stroj, jehož princip a funkce je od svého vzniku prakticky nezměněna. Transformátor může přeměňovat přivedené hodnoty napětí a proudu o vstupním výkonu na jiné požadované parametry. Díky transformátoru můžeme transformovat střídavé jednofázové i vícefázové elektrické výkony. Dále lze transformátory využívat kromě transformace napětí a proudu i k transformování počtu fází. Tato vlastnost se nejčastěji využívá u transformátorů, které napájejí usměrňovače.

Během transformace zůstává výkon transformátoru prakticky nezměněný, pokud ne přihlížíme k malé spotřebě činného a jalového výkonu v samotném transformátoru. U transformátorů středních výkonů se lze s účinností dostat až k 98%. Dalším velkým plusem jsou nízké náklady na chod a údržbu transformátoru, které jsou takřka zanedbatelné i díky tomu, že neobsahují žádný točivý předmět a poměrně jednoduché konstrukci. Rukou v ruce jde s tímto faktem i jejich větší spolehlivost. Výše zmíněné vlastnosti napomáhají přenosu vysokých a velmi vysokých napětí při malém proudu, neboť pro ekonomický přenos je nutné elektrickou energii během její cesty od výrobce ke spotřebiteli několikrát transformovat, jak je znázorněno na Obr. 1.1. Tím se transformátory stávají nepostradatelnou složkou v celém energetickém systému.[1]

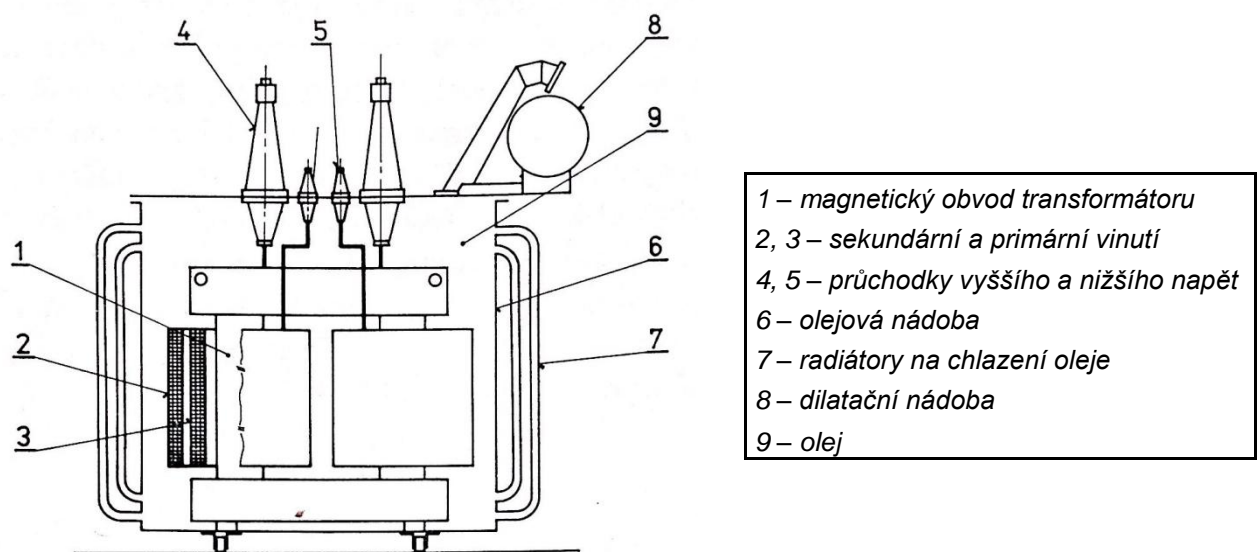


Obr. 1.1 Schéma rozvodné sítě [2]

1 Transformátor

Konstrukčně se transformátor skládá ze čtyř základních pilířů, tak jak je tomu zobrazeno na Obr. 1.2.

- První nepostradatelnou součástí transformátoru je magnetický obvod, složený z plechů, které jsou z transformátorové elektrotechnické oceli. [3]
- Druhou důležitou součástí jsou elektrické obvody, které mohou být z dvou nebo několika vinutí nasazených na magnetickém obvodu. Vinutí je od magnetického obvodu navzájem izolováno. [3]
- Dalším prvkem transformátoru je zařízení na jeho chlazení. Může být chlazen vzduchem, nebo kapalinou, kterou nejčastěji zastupuje transformátorový olej. Je možné používat i jejich kombinace, avšak jejich funkce je stále stejná a to odvádět teplo, které vzniká přeměnou ztrát v magnetickém obvodu a ve vinutí.[3]
- Posledním důležitým prvkem transformátoru jsou jeho mechanické části konstrukce. Tyto části zajišťují mechanickou pevnost všech komponentů konstrukce, které slouží k manipulaci, transportu, přívodu a odvodu elektrické energie. [3]



Obr. 1.2 Konstrukční schéma jednofázového olejového transformátoru, převzato z [3]

1.1 Princip transformátoru

Jednofázový transformátor má dvě vinutí s různým počtem závitů N_1 a N_2 , kde index 1 označuje primární vinutí a index 2 vinutí sekundární. Vinutí jsou navinuta na feromagnetickém jádře a snahou je, aby vinutí měla společnou osu. Dojde-li k připojení primárního vinutí ke zdroji, protéká jím proud $i(t)$, následkem čehož je buzen magnetický tok Φ_1 . [1]

Transformátor se může nacházet ve dvou stavech – ve stavu naprázdno, kdy obvod sekundárního vinutí je rozpojen, nebo ve stavu nakrátko, kdy výstupní svorky jsou spojeny. Pokud jsou svorky sekundárního vinutí rozpojeny, magnetický tok Φ_1 se dělí na dvě složky. První složkou je hlavní magnetický tok Φ_{1h} , který se uzavírá přes jádro transformátoru a zabírá s druhým vinutím. Druhou složkou magnetického toku je rozptylový tok $\Phi_{1\sigma}$, který se uzavírá pouze kolem primárního vinutí a přenosu energie se neúčastní. Matematicky lze popsat magnetický tok Φ_1 rovnicí:

$$\Phi_1(t) = \Phi_{1h}(t) + \Phi_{1\sigma}(t), \quad (1.1)$$

kde jednotlivým složkám toku odpovídají reaktance a tedy i jejich indukčnosti

$$\Phi_{1h} \approx X_{1h} \approx L_{1h}, \quad (1.2)$$

$$\Phi_{1\sigma} \approx X_{1\sigma} \approx L_{1\sigma}. \quad (1.3)$$

Připojíme-li zátěž na svorky sekundárního vinutí, začne vinutím protékat proud i_2 , který vyvolává tok

$$\Phi_2(t) = \Phi_{2h}(t) + \Phi_{2\sigma}(t). \quad (1.4)$$

Složky $\Phi_{1h}(t)$ a $\Phi_{2h}(t)$ jsou fiktivními toky, které byly se zavedeny pro jejich použití v matematickém popisu. Ve skutečnosti však v jádře existuje jen výsledný magnetický tok. Tyto dvě složky $\Phi_{1h}(t)$ a $\Phi_{2h}(t)$ působí na stejné trajektorii jádra transformátoru a jejich vzájemným působením vzniká výsledný hlavní magnetický tok

$$\Phi_h(t) = \Phi_{1h}(t) + \Phi_{2h}(t). \quad (1.5)$$

Díky výslednému magnetickému toku se na jednotlivých vinutích indukuje vnitřní napětí

$$u_{i1} = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{a} \quad u_{i2} = N_2 \frac{d\Phi}{dt} . \quad (1.6)$$

Jestliže předpokládáme harmonický průběh magnetického toku Φ platí, že

$$u_i = \frac{d}{dt} (N \Phi_m \sin(\omega t)) = N \Phi_m \omega \cos(\omega t) \quad (1.7)$$

a pro efektivní hodnotu indukovaného napětí

$$U_i = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N \Phi = 4,44 f N \Phi . \quad (1.8)$$

Jedním ze základních parametrů transformátoru je převod, který je označován písmenem k . Převod transformátoru lze získat poměrem vnitřních indukovaných napětí, nebo poměrem počtu závitů. Pro převod k platí,

$$\frac{u_{i1}}{u_{i2}} = \frac{4,44 N_1 \Phi_m f}{4,44 N_2 \Phi_m f} = \frac{N_1}{N_2} = k \cong \frac{U_{1N}}{U_{2N}} . \quad (1.9)$$

Za použití zákona o celkovém proudu můžeme vyjádřit vztah pro převod proudu

$$U_m = \oint H dl = \sum I = N_1 I_1 + N_2 I_2 \quad (1.10)$$

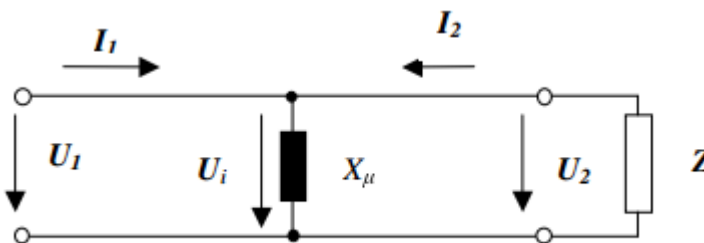
Pro siločáry hlavního magnetického toku, které vedou železným jádrem transformátoru platí, že:

$$\mu_{Fe} \rightarrow \infty \quad H_{Fe} = 0 \quad \rightarrow \quad N_1 I_1 = -N_2 I_2 \quad \text{a} \quad k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} . \quad (1.11)$$

Takto lze popsat princip transformátoru matematicky. Pokud chceme popsat princip transformátoru prakticky platí, že po připojení transformátoru na střídavé sinusového napětí u_1 , které je přivedeno na primární svorky na primární vinutí, dochází k průchodu proudu i_1 vinutím. Tento proud i_1 vytváří magnetický tok, který na základě indukčního zákona vytváří v sekundárním vinutí napětí u_2 . Pokud sekundární cívku transformátoru zatížíme zátěží, začne sekundární stranou transformátoru procházet proud o okamžité hodnotě i_2 . [1][6]

1.2 Náhradní schéma ideálního transformátoru

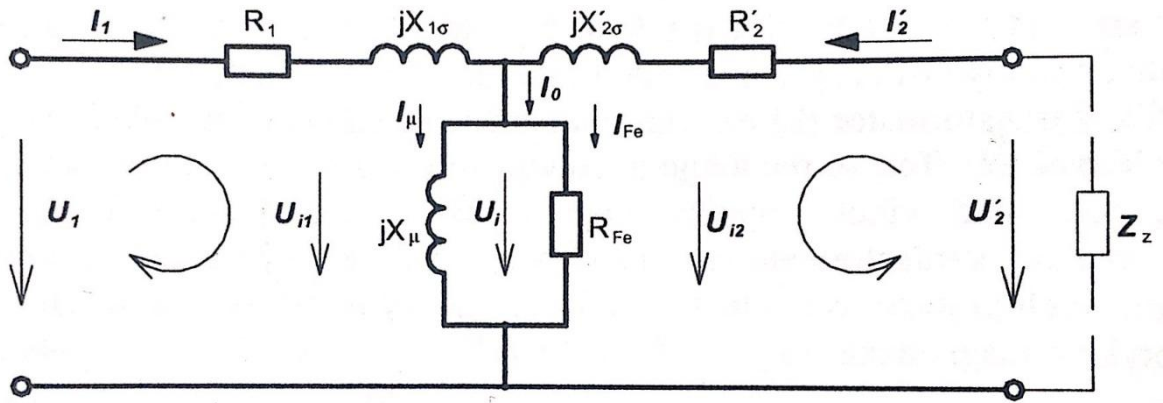
Ideální transformátor je definován jako transformátor, jehož odpor vinutí je nulový a jehož magnetická vodivost vazebního obvodu je nekonečně velká. Stejně tak i rozptylové toky ideálního transformátoru jsou nulové. Pokud budeme uvažovat převod transformátoru roven jedné, lze schéma ideálního transformátoru nakreslit jako je tomu na obrázku 1.3. Vzhledem k tomu, že je převod transformátoru roven jedné, je možné vinutí galvanicky spojit. Pokud však bude převod transformátoru jiný než jedna, je nutné všechny hodnoty na sekundární straně přepočítat podle strany primární. Reaktance X_{μ} , která je zobrazena ve schématu představuje vazební, neboli magnetizační reaktanci, která je nazývána hlavní reaktancí. [6]



Obr. 1.3 Náhradní schéma ideálního transformátoru, převzato z [6]

1.3 Náhradní schéma reálného transformátoru

Náhradním schématem u transformátoru se rozumí kombinace pasivních prvků obvodu, kam patří odpory společně s indukčnostmi, jejichž vlastnosti za použití zjednodušujících předpokladů odpovídají vlastnostem transformátoru. Náhradní schéma reálného transformátoru platí pro harmonické průběhy veličin a zároveň pro ustálený stav transformátoru. Transformátor lze díky náhradnímu obvodu popsat pomocí algebraických rovnic, musí se však dodržovat pravidla Kirchhoffových zákonů. Řešením těchto rovnic lze získat průběhy proudů ve schématu a při znalostech vztahů mezi náhradním schématem a reálným transformátorem i velikosti proudů skutečného transformátoru. Známe-li charakteristiky transformátoru naprázdno a nakrátko, můžeme vypočítat parametry hodnot transformátoru, jimiž jsou odpory primárního a sekundárního vinutí a jednotlivé reaktance. Na obrázku 1.4 je znázorněno náhradní schéma reálného transformátoru, které je ve tvaru T článku.[1]



Obr. 1.4 Náhradní schéma reálného transformátoru, převzato z [1]

Na schématu je patrné, že veličiny vyskytující se na sekundární straně, jsou převedeny na stranu primární. Takové to veličiny jsou označeny čárkou v horním indexu a platí pro transformátor s převodem jedna. Schéma je platné pro všechny transformátory, které mají libovolný počet závitů N_1 a N_2 . Skutečné hodnoty prvků na sekundární straně lze získat vyřešením rovnic, pro které platí vztahy:

$$U'_2 = kU_2, \quad (1.12)$$

$$I'_2 = \frac{1}{k}I_2 \text{ a} \quad (1.13)$$

$$Z'_2 = k^2Z_2. \quad (1.14)$$

Pro napěťové rovnice náhradního schématu platí:

$$U_1 = R_1I_1 + jX_{1\sigma}I_1 + U_i = R_1I_1 + jX_{1\sigma}I_1 + jX_\mu(I_1 + I'_2) \text{ a} \quad (1.15)$$

$$U'_2 = R'_2I'_2 + jX'_{2\sigma}I'_2 + U_i = R'_2I'_2 + jX'_{2\sigma}I'_2 + jX_\mu(I_1 + I'_2). \quad (1.16)$$

Po úpravě těchto rovnic dostaneme rovnice ve tvaru

$$U_1 = (R_1 + jX_1)I_1 + jX_\mu I'_2 \text{ a} \quad (1.17)$$

$$U'_2 = jX_\mu I_1 + (R'_2 + jX'_2)I'_2. \quad (1.18)$$

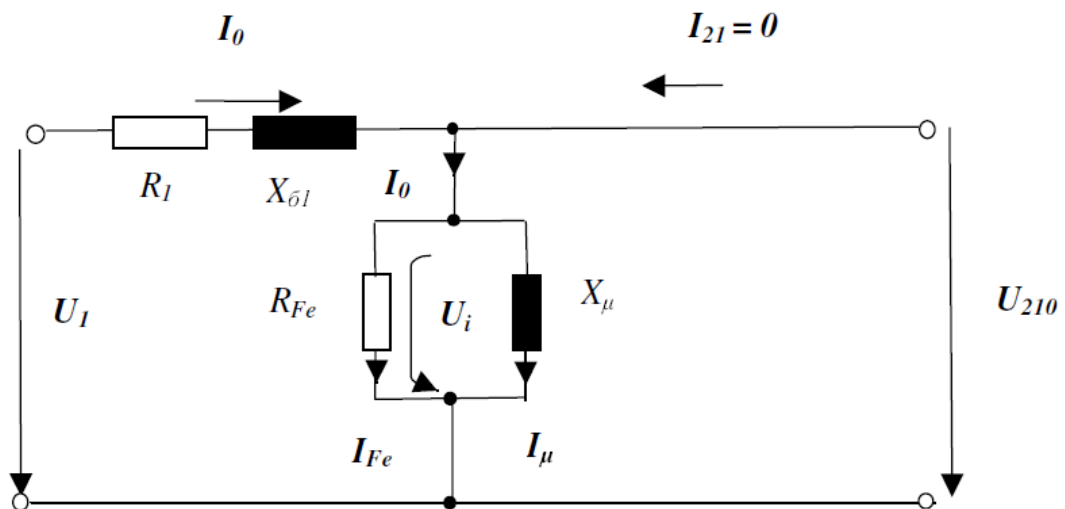
Celkové reaktance primárního a sekundárního vinut lze vyjádřit jako

$$X_1 = X_{1\sigma} + X_\mu \text{ a} \quad (1.19)$$

$$X_2 = X_{2\sigma} + X_\mu . \quad (1.20)$$

Tyto rovnice byly použity z literatury [1] a [6].

1.4 Transformátor naprázdno



Obr. 1.5 Náhradní schéma transformátoru naprázdno, převzato z [6]

Na obrázku 1.5 je možné vidět náhradní schéma transformátoru naprázdno, což představuje nezátížený transformátor, kdy na sekundárních svorkách není nic připojeno. Proud I_2 se tedy rovná nule a transformátor je pouze pod napětím. Při tomto ději odebírá transformátor ze sítě pouze proud I_0 , který je nazýván proudem magnetizačním a jeho velikost je relativně malá. Většinou se jeho hodnota pohybuje od 1 % do 10 % proudu jmenovitého. V transformátoru dochází pouze ke vzniku ztrát naprázdno a pokud se zaměříme na náhradní schéma, můžeme z něho vypočítat, co určuje ztráty naprázdno. Ztráty v transformátoru budou představovat Joulovy ztráty, které budou vznikat na odporech R_1 a R_{Fe} . Ztráty R_1 reprezentují činné ztráty, R_{Fe} ztráty v železe.[6]

Při měření transformátoru naprázdno se určuje proud I_0 , napětí naprázdno U_0 a příkon naprázdno P_0 . Příkon takového transformátoru bude spotřebován na krytí ztrát a platí pro něj:

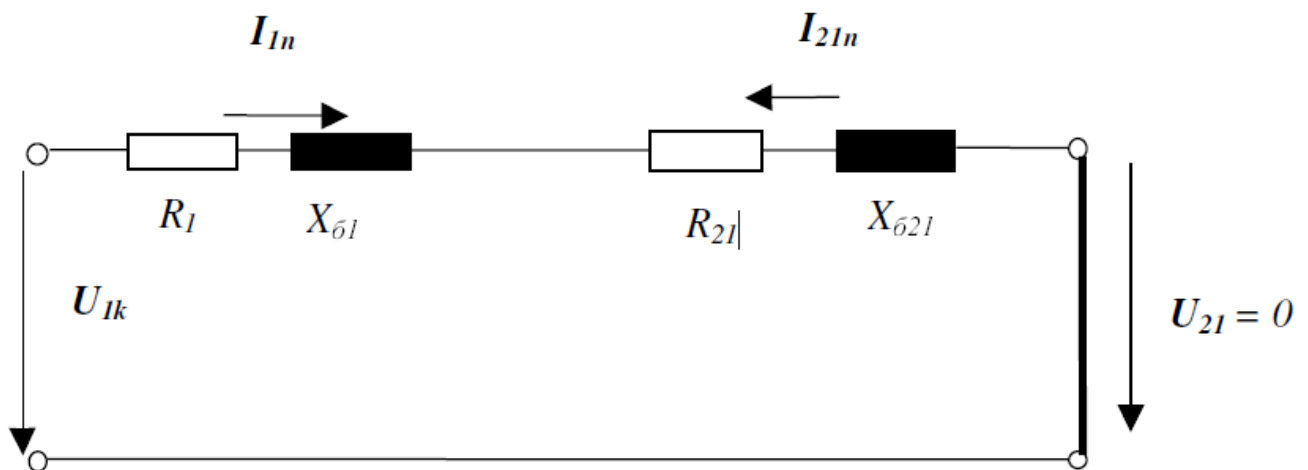
$$\Delta P_0 = \Delta P_{1j0} + \Delta P_{Fe}, \quad (1.21)$$

kde ΔP_{Fe} je součtem hysterezních ztrát a ztrát vířivými proudy v železe.

U trojfázového transformátoru platí, že hodnota Joulových ztrát ve vinutí se dá určit z rovnice 1.22, pro kterou musíme znát hodnotu odporu R_s a magnetizačního proudu I_0 . [7]

$$\Delta P_{1j0} = \frac{3}{2} R_s I_0^2 \quad (1.22)$$

1.5 Transformátor nakrátko



Obr. 1.7 Náhradní schéma transformátoru nakrátko, převzato z [6]

V tomto stavu se může transformátor nacházet buď poruchou, nebo vyzkratováním sekundárních svorek, jak je patrné na obrázku 1.7. V prvním případě – poruše, je transformátor napájen jmenovitým napětím. Vznikne-li zkrat, proběhne přechodový děj a vinutím protéká přibližně 25 násobek jmenovitého proudu. Tím se mnohonásobně zvýší Joulovy ztráty - pokud proud je 25 násobkem, pak Joulovy ztráty jsou 625krát větší než

jmenovité ztráty. Takto vznikne teplo, které pokud nezapůsobí nějaké ochrany, zničí transformátor. [6]

Při zapojení transformátoru nakrátko je napětí U_{21} rovno nule, také jinak je sekundární vinutí vyzkratováno vodičem. Při průchodu jmenovitého proudu transformátorem je hodnota napětí na primárním vinutí U_{kn} – napětí nakrátko. Toto napětí se většinou uvádí v poměrných hodnotách a pro lineární magnetický obvod v chodu nakrátko platí vztah

$$u_k = \frac{U_{kn}}{U_n} = \frac{I_n U_k}{U_n I_k} = \frac{Z_k}{Z_n} = z_k . \quad (1.23)$$

Velikost napětí nakrátko se pohybuje v poměrných hodnotách v rozmezí přibližně 4 % až 12 % pro transformátory o velkých výkonech. U transformátorů pro výkonovou elektroniku se horní mez může pohybovat až k 30 procentům. Hodnota napětí nakrátko je měřítkem pro tvrdost zdroje, kdy malá hodnota u_k znamená menší úbytek napětí na impedanci transformátoru a transformátor je tedy tvrdší. Nižší hodnota také znamená menší zkratuvzdornost v porovnání s transformátorem, který má hodnotu u_k větší. Jediné, co omezuje zkratový proud je velikost impedance z_k . Měření transformátoru nakrátko se provádí podobně jako při chodu naprázdno, také jinak příkon transformátoru je spotřebovává na krytí Joulových ztrát v primárním a sekundárním vinutí a ztrát přídatných, jak je možné vidět v rovnici 1.24.

$$\Delta P_k = \Delta P_{jk} + \Delta P_d \quad (1.24)$$

Ve stavu nakrátko se nachází magnetický obvod v nenasyceném stavu, neboť proudy procházející primárním a sekundárním vinutím jsou v protifázi. To platí, pokud je zanedbán proud procházející příčnou větví. [1][7]

1.6 Trojfázové transformátory

Během transformace trojfázového proudu se můžou použít dva druhy transformátorů. Jedním druhem jsou transformátory jednofázové, které jsou samostatně zapojené do každé ze tří fází. Druhou možností je použít transformátor trojfázový, neboli transformátor, který díky svojí konstrukci obsahuje tři vinutí, které protíná jedno společné magnetické jádro. Více se

však používají transformátory trojfázové, protože nevyžadují tolik materiálu tak, jako spotřebují tři jednofázové transformátory. Naopak v případě použití tří jednofázových transformátorů není potřeba mít v záloze velké množství instalovaného výkonu v záložních řešeních. Neboť v případě výpadku nedojde ke kompletní odstávce, jak by tomu bylo u transformátoru trojfázového, ale je možné dělat potřebná opatření na jednotlivých transformátorech bez omezení funkce ostatních. [3]

Při spojení transformátorů tak, že se jejich vertikální spojky vzájemně dotýkají, vytvářejí magnetické toky, které procházejí jednotlivými jádry souměrné soustavy. Ve středním jádře je součet okamžitých magnetických toků, které jsou od sebe navzájem natočeny o 120 stupňů roven nule a je možné prostřední sloupek vynechat, protože platí rovnice 1.25:

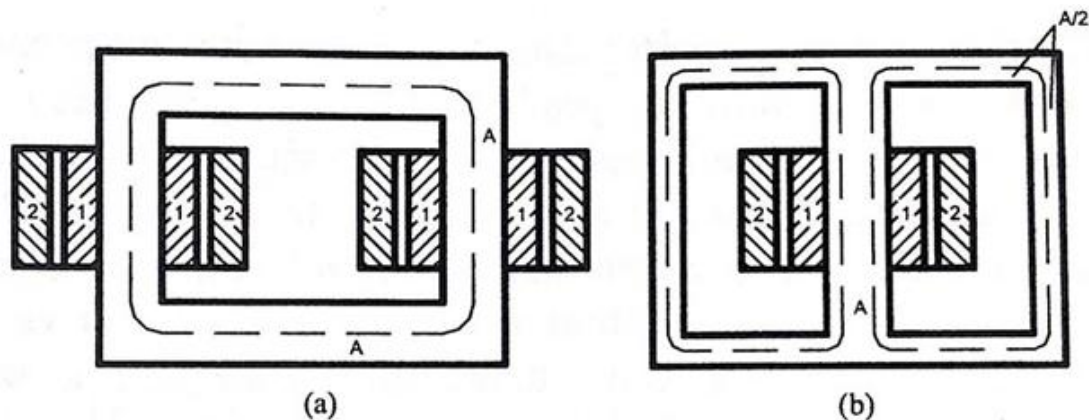
$$\Phi_u + \Phi_v + \Phi_w = 0 \quad (1.25)$$

Tímto krokem sice vznikne jistá nesymetrie, kdy krajní fáze mají větší magnetický odpor a tedy i jejich magnetizační proud musí být větší pro požadované napětí. Tato nesymetrie však není překážkou, neboť proud $I_\mu \ll I_{1n}$. [1]

Trojfázové transformátory je možno zapojit třemi různými způsoby. Prvním způsobem je zapojení do hvězdy, které je označováno jako Y(y). Druhým způsobem je zapojení do trojúhelníku, označované jako D(d) a posledním způsobem je zapojení do lomené hvězdy Z(z). Velká písmena značí primární stranu vinutí, písmena malá označují stranu sekundárního vinutí. Dalším parametrem, který informuje o vlastnostech transformátoru je hodinové číslo. Hodinové číslo je vzájemné fázové natočení fázorů primárního a sekundárního napětí stejnojmenných fází. Je měřené od strany vyššího ke straně nižšího napětí ve smyslu sledu fází. Tato hodnota není neměnná, záměnou svorek začátků a konců vinutí se hodnota hodinového čísla změní o 6, cyklickou záměnou svorek se změní o 4 a necyklickou záměnou o 10. Takovéto hodinové číslo je udáváno za označením zapojení transformátoru, například Yy0. [3]

2 Magnetický obvod transformátoru

Jádra magnetických obvodů jsou velmi důležitou součástí pro výrobu transformátorů a na jejich vlastnostech jsou závislé finální parametry magnetického obvodu, popřípadě celého transformátoru. Jádru transformátoru vytváří magnetický obvod, přes který protéká indukční tok, který je vyvolán průchodem proudu přes primární vunutí. Díky tomu se indukuje elektrické napětí v sekundárním vunutí.



Obr. 2.1 Schématické znázornění transformátoru, převzato z [1];
(a) – jádrový transformátor, (b) – plášťový transformátor

2.1 Dělení konstrukce magnetického obvodu

- **Jádrové transformátory**

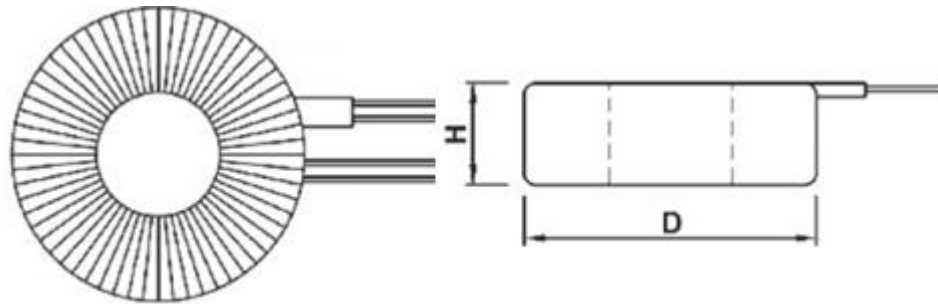
Jádrový transformátor na obr. 2.1 (a) má primární i sekundární vunutí rozdělené na dvou jádrech a umístěné na sobě tak, že vunutí na nižší napětí je blíže k jádru. Jádra jsou spojeny tzv. spojkami a u tohoto typu transformátoru mají jádra i spojky přibližně stejný průřez, protože vedou celý magnetický tok.[1]

- **Plášťové transformátory**

U plášťového transformátoru na obr. 2.1 (b) jsou vunutí umístěna na středním sloupku, přes který teče celý hlavní magnetický tok. Následně se magnetický tok rozděluje a uzavírá se spojkami a krajními jádry, na kterých už není umístěno žádné vunutí. Spojky mají zpravidla poloviční průřez v porovnání s transformátorem jádrovým, což je významné zejména u výkonových trojfázových transformátorů. Plášťový transformátor má také menší rozptylové magnetické toky a tedy $X_{1\sigma} i_1$ a $X_{2\sigma} i_2$, jeho sekundární napětí kolísá méně s měnící se zátěží a je považován za tvrdší než transformátor jádrový.[1]

- **Toroidní transformátory**

Transformátory s toroidními jádry se vyznačují nízkým rozptylem elektromagnetického pole a nízkým proudem naprázdno. Dalším kladem toroidního transformátoru je jeho vysoká účinnost a snadná montáž, kde se vývody standardně vyvádějí na jedné straně toroidu. Toroidy jsou vyráběny z orientovaného transformátorového plechu, kde je obsah křemíku kolem 3%. Na obrázku 2.2 je znázorněné uspořádání toroidu. [4]



Obr. 2.2 Schématické znázornění toroidního transformátoru, převzato z [11];

2.2 Konstrukce magnetického obvodu transformátoru

Kostra transformátoru, jinak řečeno magnetický obvod (feromagnetické jádro) je složen z jednotlivých od sebe navzájem izolovaných transformátorových plechů. Díky tomu, že jsou plechy od sebe navzájem odizolovány, dochází ke snížení ztrát v železe. Tomu napomáhá i to, že použité transformátorové plechy jsou orientované a za tepla válcované. Tyto typy plechů umožňují navýšit hodnoty indukce v jádře až na 1,8T ve směru orientace. Ve směru orientace je také veden magnetický tok v jádře. Vyšší hodnoty indukce dovolují zmenšit průřez jádra a tím lze snížit i celkovou hmotnost transformátoru. [1]

Feromagnetické jádro je zpravidla odstupňováno tak, aby co nejlépe vyplňovalo kruhovou plochu mezi jádrem a vinutím. Úsporou místa se zkrátí délka závitů, čímž se sníží ztráty ve mědi. Transformátorové plechy jsou voleny s ohledem na frekvenci, při které bude transformátor používán. Do stovek Hz se používají křemíkové oceli o tloušťce 0,35 mm, pro vysoké frekvence se používají lisované práškové slitiny. Pro vysokofrekvenční transformátory je nutné použít materiály s vysokou počáteční magnetickou vodivostí, neboť vstupní napětí jsou řádově v mV a proudy v μV . [1]

2.3 Transformátorové plechy

- *Elektrotechnické plechy Et*

Plechy Et byly vyráběny v několika magnetických vlastnostech, které byly charakterizovány ztrátovým číslem p_1 . U nás se vyráběly plechy Et 1,3 a Et 1,3s. Plech Et 1,3 se vyráběl o tloušťce 0,35 mm, který byl za studena doválcovaný pro zvýšení činitele plnění. Činitel plnění díky tomuto postupu vzrostl z 92 % na 96 %. Plech Et 1,3s se vyráběl v tloušťce 0,5 mm. Plechy Et se ztrátovým číslem p_1 do 1,8 W/kg se označovaly jako transformátorové plechy. Pokud ztrátový činitel byl vyšší jak 1,8 W/kg, plechy byly označovány jako dynamové plechy, které sloužily převážně k výrobě motorů. V dnešní době jsou Et plechy zastaralé a nahrazují je plechy typu Eo a dynamové plechy Ei. Magnetizační charakteristiky plechů Eo v porovnání s plechem Et jsou zobrazeny v tabulce Tab. 2.1.[5]

Tab 2.1 Porovnání vlastností plechů Eo s plechy Et 1,3 [5]

H (A/cm) (amplituda)	B (T)						
	Eo 10 0,30 mm	Eo 11 0,30 mm	Eo 12 0,35 mm	Eo 13 0,35 mm	Eo 15 0,35 mm	Eo 17 0,35 mm	Et 1,3 0,35 mm
0,3	1,2	1,12	1,1	0,97	0,84	0,74	0,05
1	1,6	1,56	1,52	1,48	1,41	1,35	0,6
5	1,74	1,7	1,64	1,7	1,65	1,6	0,8
10	1,8	1,76	1,76	1,74	1,72	1,67	1,2
25	1,88	1,84	1,8	1,85	1,82	1,77	1,51
100	1,98	1,96	1,94	1,98	1,96	1,94	1,82
$p_{0,5}$	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,2	0,38
$p_{1,0}$	0,49	0,52	0,56	0,59	0,64	0,7	1,3
$p_{1,5}$	1,02	1,12	1,23	1,35	1,48	1,62	3,2
$p_{1,7}$	1,65	1,75	1,9	1,93	2,16	2,36	4,2
(při cca 0,5 A/cm) μ_{\max}	50000	40000	30000	30000	25000	20000	4000

- *Elektrotechnické plechy Eo*

V dnešní době jsou tabulové plechy pro stavbu transformátorů nahrazovány kontinuálně vyráběnými svitky pásu Eo (elektrotechnický plech orientovaný) válcovanými za studena. Technologickým zpracováním se orientuje uspořádání krystalů a tím vzniká magnetická textura. Železo, které krystaluje v kubické soustavě má hranu krychle ve směru snadné

magnetizace, kdežto ve směru plošné úhlopříčky je magnetizace nesnadná. Po válcování za studena následuje tepelné zpracování pásů v průběžných pecích v ochranné atmosféře. Při tomto procesu dochází k oduhlčení a rekystalizaci. Současně probíhá opatření pásů tenkou vrstvou izolace Kerizol o tloušťce 2 až 5 μ m, která jednak zabraňuje vzájemnému svaření jednotlivých svitků při tepelném zpracování a v druhé řadě izoluje plechy v magnetickém obvodu, což má za následek zmenšení ztrát vířivými proudy. Takto připravené pásy mají hladký povrch a rovnoměrné magnetické i mechanické vlastnosti.[5]

Plech Eo se vyrábějí v druzích kvality od Eo 9, Eo 10, Eo 11, Eo12, Eo 13, Eo 14, Eo 15 po Eo 17 a v tloušťkách 0,28 až 0,35 mm. Nejpoužívanějším plechem je plech Eo 10 a Eo 11. Číslo, které je vyznačeno za Eo určuje ztrátové číslo, které je vyjádřeno v desetínách W/kg. Takto nízké ztráty dosahují plechy jen v případě, že indukční tok, který jimi teče je orientován ve směru snadné magnetizace a dosahují rovněž indukci blízkou nasycení při nižších polích než plechy Et. Díky těmto vlastnostem, které jsou uvedeny v tabulce Tab 2.2, jsou Eo plechy hojně využívány i když je jejich cena oproti plechům Et několikanásobně vyšší. [5]

Tab 2.2 Magnetické vlastnosti plechů a pásů pro elektroniku válcovaných za studena s magnetickou texturou [5]

Jakost VP 42 0231	Tl. (mm)	$p_{1,5}$	$p_{1,7}$	Minimální indukce (T) při amplitudě int. magnetického pole (A/m)				Značka výrobce	AISI	DIN 46400/3	EN 10107
				B_{100}	B_{1000}	B_{2500}	B_{10000}				
Eo 089-27-N	0,27	0,89	1,30		1,82			Eo 9	M-4	VM 89-27N	M 089-27N
Eo 085-30-N	0,3	0,85	1,34		1,84			Eo 9			
Eo 092-30-N		0,92	1,30	1,6	1,8	1,90	1,98	Eo 10	M-4		
Eo 097-30-N		0,97	1,45	1,6	1,77	1,85	1,98	Eo 10	M-5	VM 97-30N	M 097-30N
Eo 107-30-N		1,07	1,50	1,56	1,77	1,80	1,96	Eo 11			
Eo 101-35-N	0,35	1,01	1,60	1,52	1,8	1,88	1,98	Eo 11	M-5		
Eo 111-35-N		1,11	1,58	1,52	1,7	1,84	1,96	Eo 11	M-6	VM 111-35N	M 111-35N
Eo 120-35-N		1,20	1,65	1,52	1,7	1,80	1,94	Eo 12			
Eo 130-35-N		1,30	1,75	1,48	1,67	1,80	1,92	Eo 13			
Eo 150-35-N		1,50	1,90	1,41	1,62	1,76	1,90	Eo 15			

- **Elektrotechnické plechy Ei**

Ei plechy se používají převážně při výrobě asynchronních motorů a pro výseky plechů pro jádra malých transformátorů. Tyto plechy jsou magneticky izotropní, což znamená, že mají ve všech směrech přibližně stejné vlastnosti. Oproti plechům Et mají plechy Ei podstatně nižší ztráty, především však ztráty hysterezní. Májí také lepší mechanické vlastnosti, jsou hladší a dosahují dobrého činitele plnění. Tabulka Tab 2.3 ukazuje vlastnosti plechů a pásů pro elektrotechniku, které jsou válcované za studena a jsou magneticky izotropní. Tyto plechy jsou vyráběny v kvalitách od Ei 33, Ei 35, Ei 40, Ei 45, Ei 50, Ei 55, Ei 60, Ei 70 až do Ei 80 o tloušťkách 0,5 mm a 0,65 mm, kdy číslo opět ukazuje ztráty ve W/kg při 1,5 T a 50 Hz. [5]

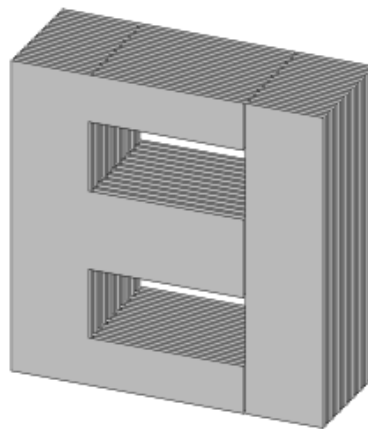
Tab 2.3 Zaručované vlastnosti plechů a pásů pro elektrotechniku válcovaných za studena magneticky izotropní[5]

Jakost	Tloušťka (mm)	p1,0 (W/kg)	p1,5 (W/kg)	Min hodnota magn. indukce (T) při amplitudě mag. pole (A/m)			Max. anizotropie (%)
				2500	5000	10000	
Ei 33	0,50	1,40	3,30	1,50	1,60	1,70	18
Ei 35	0,50	1,50	3,50	1,50	1,60	1,71	14
Ei 40	0,50	1,70	4,00	1,53	1,62	1,73	14
Ei 45	0,50	1,80	4,30	1,54	1,64	1,74	14
Ei 50	0,50	2,00	4,70	1,55	1,64	1,75	14
Ei 55	0,50	2,30	5,30	1,56	1,65	1,76	14
Ei 60	0,50	3,60	6,00	1,58	1,67	1,78	14
Ei 70	0,50	3,00	6,80	1,58	1,67	1,78	14
Ei 80	0,50	3,50	8,00	1,58	1,68	1,78	14
Ei 55	0,65	2,30	5,30	1,55	1,64	1,75	14
Ei 60	0,65	2,60	6,00	1,58	1,67	1,78	12
Ei 70	0,65	3,00	6,80	1,58	1,67	1,78	12
Ei 80	0,65	3,59	8,00	1,58	1,68	1,78	12

2.4 Tvary transformátorových plechů a jejich skládání

Dle způsobu spojení jader se spojkami se rozlišují magnetické obvody s tupým stykem a magnetické obvody, kde v místě jejich styku jsou plechy přeplátovány. V magnetických obvodech s tupým stykem se jádra a spojky skládají z plechů samostatně, poté jsou pomocí vertikálních stahovacích nosníků spojovány. U těchto obvodů se jádra i spojky skládají současně, aby tvořily uzavřený obvod. Po jejich složení dochází k vyjmutí spojky, na jádra jsou umístěna vinutí a následně je spojka vrácena zpět. Výhodou tupých styků je poměrně snadná montáž a demontáž magnetického obvodu společně s vinutím. To je jedna z mála výhod, neboť u jader skládaných natupo jsou značnou nevýhodou vířivé proudy. Ty vznikají v místech styku, které vznikají překrytím spojky a jádra. Vířivými proudy vzniknou dodatečné ztráty, způsobující ohřátí železa v místech styku. Proto je konstrukce těchto typů jader omezena a používá se jen málokdy – například pro výrobu tlumivky. [3]

U spojení přeplátováním vzniká v místech spojení jader a spojek také ke vzniku ztrát, úbytku magnetického napětí a ztrátám v železe. Tyto ztráty jsou však podstatně menší, než u jader skládaných natupo. Proto jsou v dnešní době používány magnetické obvody z orientovaných válcovaných plechů, u kterých magnetické vlastnosti jsou lepšími ve směru válcování, než ve směru na něj kolmém. Úbytky magnetického napětí a ztráty v železe jsou v místech ohybu indukčních siločár při jejich přechodu z jádra do spojky větší, než ve vlastním jádře a spojce. Tento jev se dá částečně odstranit použitím listů plechů takových, které mají zkosené hrany a jejich způsob přeplátování se liší od klasického přeplátování. Výhodou jsou nižší ztráty, oproti tomu je konstrukce o něco složitější. [3]



Obr. 2.3 Transformátorové plechy EI, převzato z [9]

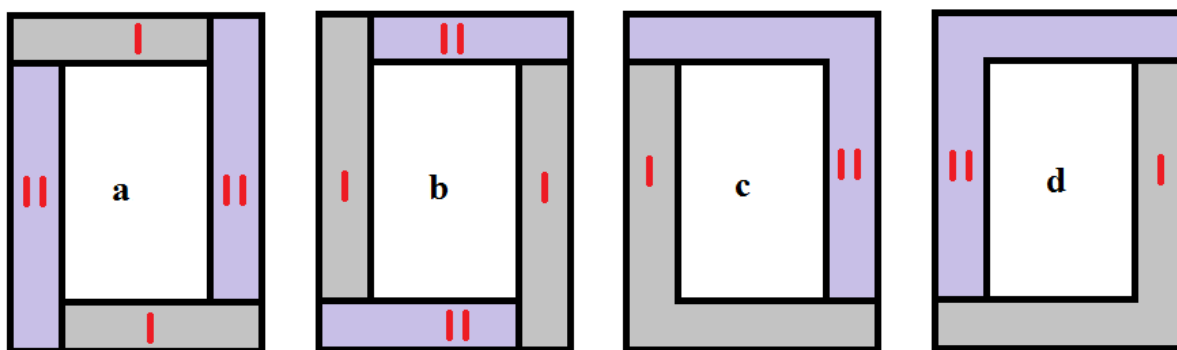
- **EI jádra**

Jádra tvaru EI dostaly název podle svého tvaru. Jsou tvořeny prvky, které mají tvar písmene E a písmene I, jak je patrné na obrázku 2.3. Vyrábí se vysekáváním z ocelokřemíkových plechů a pro výrobu jsou nejvýhodnější, neboť mají malý výrobní odpad. Proto se jim také někdy říká plechy bezodpadové. Nevýhodou těchto typů jader je však přechod magnetického toku, který musí překonat úhel o velikosti 90 stupňů. Plechy jsou na sebe kladeny střídavě, což se používá pro síťové transformátory, nebo jsou na sebe pokládány shodně, kde se tohoto využívá u transformátorů se stejnosměrným sycením. [8]

- **M jádra**

M jádra jsou také vysekávány z transformátorových plechů, jejich nevýhodou je však značný odpad oproti plechům EI. Mají o něco menší magnetický rozptyl než ostatní skládaná jádra. Použití našly M jádra v telekomunikační technice. Avšak díky svojí vyšší ceně, která je způsobena odpadem při výrobě těchto plechů se M jádra na trhu moc neobjevují. [10]

- **I a L jádra**



Obr. 2.4 Postup při skládání I a L plechů, [10];
 a) I plech 1. vrstva, b) I plech 2. vrstva
 c) L plech 1. vrstva, d) L plech 2. vrstva

V praxi se používají transformátorové plechy vyseknuté ve tvaru písmene I. Takto vyseknuté plechy jsou následně přes sebe překládány tak, že na místě, kde ve vrstvě pod byl plech vedle sebe je následující plech v nové řadě v celku. Výrobně jsou tyto plechy nejjednodušší, avšak jejich nevýhodou je větší rozptyl magnetického toku. Použití nacházejí například u transformátorů sloužících ke svařování. Plechy ve tvaru písmene L jsou skládány podobně jako plechy I, tedy také přes sebe a jsou překládány jejich spoje. Na výrobu jsou tyto

plechy o něco nákladnější než plechy I, jelikož se nedají stříhat strojními nůžkami a musejí být vysekávány. Na obrázku 2.4 je znázorněno, jakým způsobem jsou přes sebe plechy překládány. [10]

3 Modelování magnetického pole

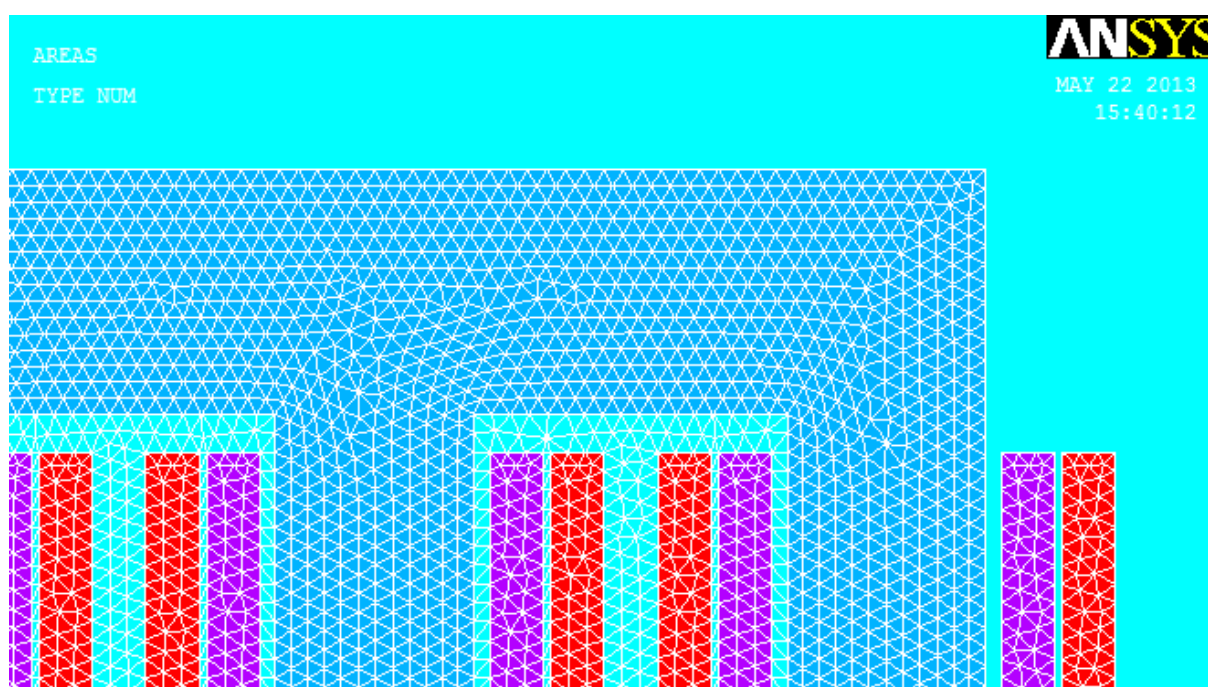
V této kapitole se bakalářská práce bude věnovat již samotnému modelování. Bude zde popsána metoda konečných prvků, bude zde popsán program Ansys a následně i průběh modelování samotného transformátoru.

3.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků vznikla kvůli potřebě řešit složité úlohy z inženýrské praxe. Především byla vyvinuta na řešení úloh z pružnosti a strukturní analýzy. Počátky metody konečných prvků lze nalézt již v roce 1941 v práci Alexandra Hrennikoffa a Richarda Couranta v roce 1942. Metody, které použili byly na první pohled odlišné, přesto se však shodovali v jednom bodě. Tím bodem bylo rozdělení spojité oblasti do oblasti množin samostatných podoblastí. Jedna z prací rozdělovala oblast pomocí mřížky, druhá práce rozdělovala oblast do konečného množství trojúhelníkových elementů. Vývoj metody konečných prvků začal v padesátých letech 20. století na univerzitě ve Stuttgartu prací Johna Argyrise a po něm pokračoval v 60. letech na univerzitě v Berkeley Ray W. Clough. Koncem šedesátých let se do této metody zapojila NASA, která vyvinula software NASTRAN, který pracuje na principu metody konečných prvků. [12]

Metoda konečných prvků je numerickou metodou sloužící k simulaci průběhu napětí, deformací, vlastních frekvencí, proudění tepla, proudění tekutin a pro tuto práci důležitou simulací jevů elektromagnetismu na vytvořeném fyzikálním modelu. Principem metody konečných prvků je diskretizace spojitého kontinua do určitého počtu prvků, kde zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. Metoda konečných prvků je používána především pro kontrolu již navržených zařízení, nebo pro stanovení kritického místa konstrukce. Principy metody jsou známy již delší dobu, její masové použití se rozmohlo až s nástupem výpočetní techniky. [12]

Princip metody je založen na řešení soustavy diferenciálních rovnic, které popisují vlastnosti určitého fyzikálního problému. Analytické řešení diferenciálních rovnic nepředstavuje problém dokud se jedná o základní fyzikální úlohy a jednoduché tvary geometrických těles. U složitějších analýz, jsou naopak charakteristické fyzikálně komplexní, matematicky diskontinuální soustavy u těles s mnohdy velmi složitou geometrií. Právě pro řešení těchto problémů se ukázala jako nejvhodnější numerická aproximační metoda, která je právě onou metodou konečných prvků. Nejprve je nutné rozdělit geometricky definovaný objekt na konečný počet elementů, které vyplňují s dostatečnou přesností jeho tvar.

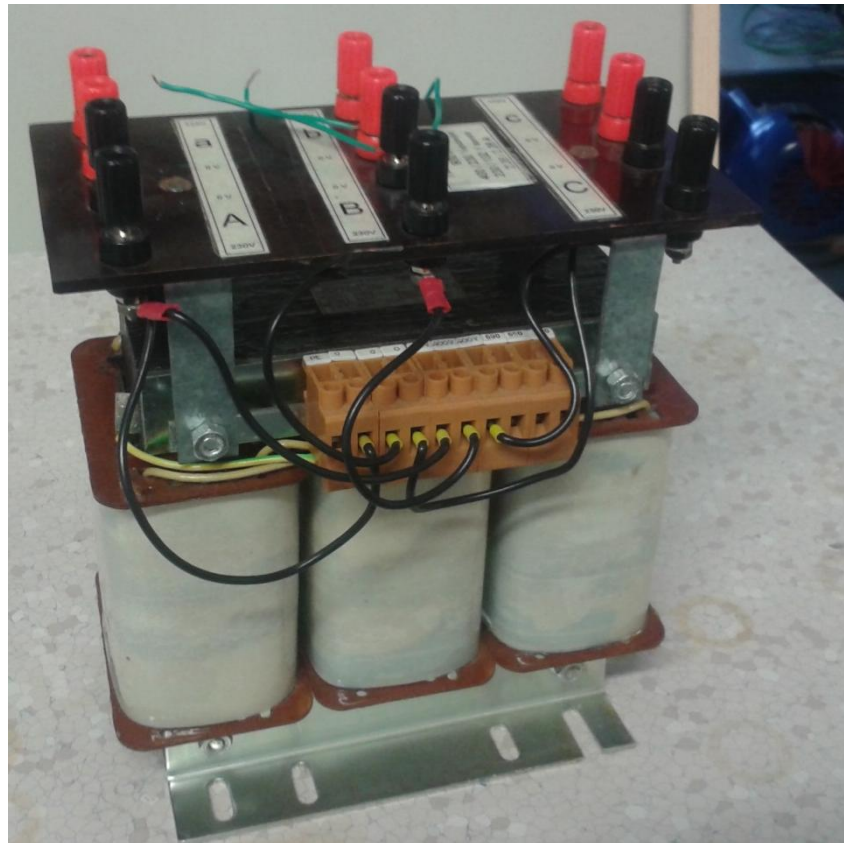


Obr. 3.1 Rozdělení oblasti na elementy

Jednotlivé elementy jsou vzájemně spojeny v místech zvaných uzly. Tyto uzly jsou matematické body, které mají známé souřadnice v prostoru a zjednodušeně lze říci, že jsou počítány hodnoty pro tyto body právě v těchto uzlech. Vlastnosti každého z elementů jsou popsány matematicky a popis celého objektu dostáváme soustavu rovnic. Řešení diferenciálních rovnic je poté převedeno na řešení algebraických rovnic, jejichž neznámé představují parametry požadovaného fyzikálního problému, který jsme se rozhodli řešit. Pro vyřešení vlastností celého objektu dostáváme soustavu s tisíci až miliony rovnic. [13]

3.2 Modelový transformátor TNC F 3256-0058

Pro modelování byl vybrán univerzitní transformátor o zdánlivém výkonu 900 VA. Jedná se o třífázový jádrový transformátor, který byl rozměrově změřen a následně použit pro modelování příkladu z magnetického pole. Transformátor je zobrazen na obrázku 3.2 a štítkové hodnoty transformátoru v tabulce 3.1.



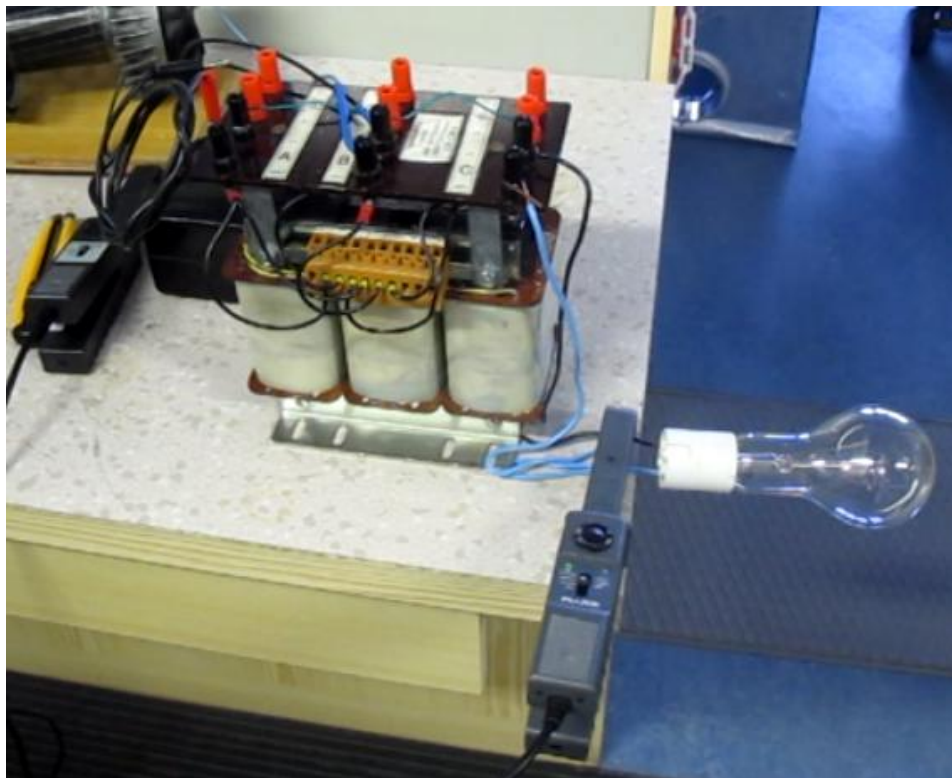
Obr. 3.2 Transformátor TNC F 3256-0058

Tab 3.1 Štítkové hodnoty transformátoru TNC F 3256-0058

Typ	TNC F3256-0058		
výkon	900 [VA]		
zapojení	Yy0		
primární strana	400 [V]	230 [V]	2,26 [A]
sekundární strana	230 [V]	132 [V]	2,26 [A]
výrobce	Elektrokov Znojmo		

3.3 Postup modelování

Samotné modelování lze rozdělit do několika kroků. Prvním krokem je definice problému, což zahrnuje celkem široký pojem. Pro tuto bakalářskou práci bylo úkolem namodelovat magnetické pole transformátoru ve stavu naprázdno, tedy problém z oblasti elektromagnetismu. Po namodelování tohoto stavu a proniknutí do problematiky modelování jsem přišel ještě s doplněním simulací o stav, který jsem našel na internetu [14]. Úloha byla zajímavá a hezky se na ní ukázalo chování transformátoru. Jak již bylo zmíněno, pro tuto úlohu posloužil univerzitní třífázový transformátor, který jsem použil jako jednofázový transformátor se dvěma postranními vinutími, kdy jedním sekundárním vinutím se ovládala žárovka připojená na druhém sekundárním vinutí, viz obrázek 3.3.



Obr. 3.3 Transformátor TNC F 3256-0058 - zapojení měření

Po připojení transformátoru ke zdroji napětí bylo prováděno měření proudů, které protékají napájecími kabelem, pravou stranou sekundárního vinutí - žárovkou a levou stranou sekundárního vinutí - zkratovacím kabelem. Pokud se sekundární vinutí na levé straně transformátoru nechalo vyzkratované, došlo k rozsvícení žárovky. Druhý případ, kdy levé svorky sekundárního vinutí byly rozpojeny, došlo ke zhasnutí žárovky. Naměřené hodnoty, které byly použity pro modelování jsou zobrazeny v tabulce 3.2.

Tab 3.2 Naměřené hodnoty transformátoru TNC F 3256-0058

		I [mA]	J[A/m ²]			I [mA]	J[A/m ²]
žárovka svítí	vstup	1260	2093	žárovka nesvítí	vstup	336	558
	žárovka	380	631		žárovka	216	358
	svorky	1240	2059		svorky	0 - rozpojeno	0

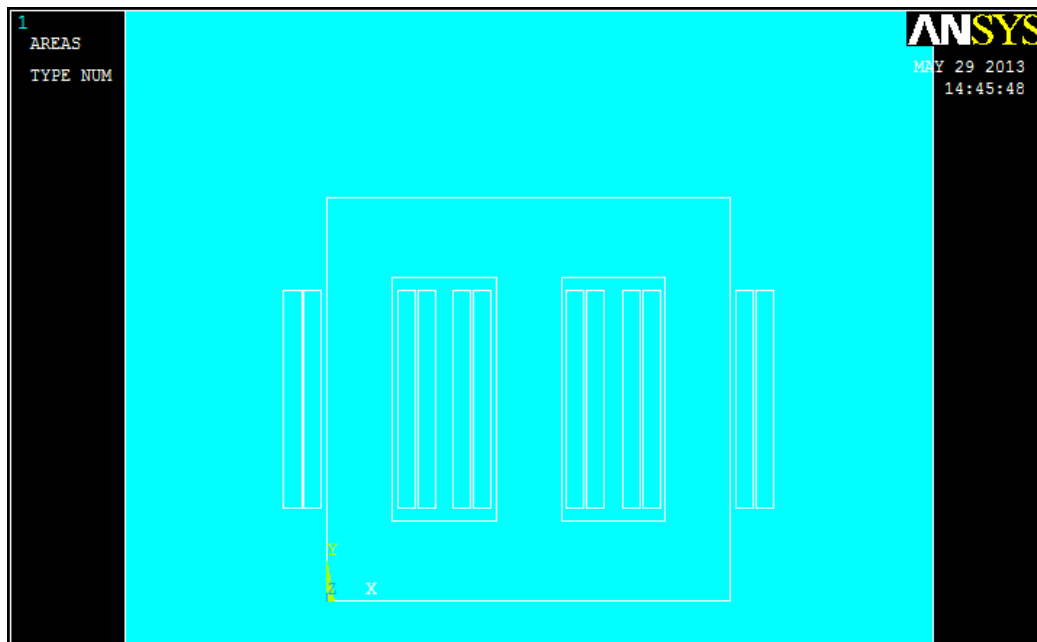
Problém je tedy definován, nyní nastává samotný postup modelování. První nepostradatelnou součástí modelování je tzv. Pre-processing.

3.3.1 Pre-processing

V této fázi dochází k vytvoření fyzikálního modelu, kde se zvolí materiálové vlastnosti a generuje se výpočet sítě. Často se zde přidávají i okrajové podmínky, které jsou podstatné pro správné vypočítání výsledků. Následuje zatěžování buď proudovou hustotou, nebo napětím.

- *Tvorba modelu*

Po změření geometrie transformátoru bylo možné zanést hodnoty do počítače a vytvořit počítačový 2D model v programu Ansys, který je k vidění na obrázku 3.3.

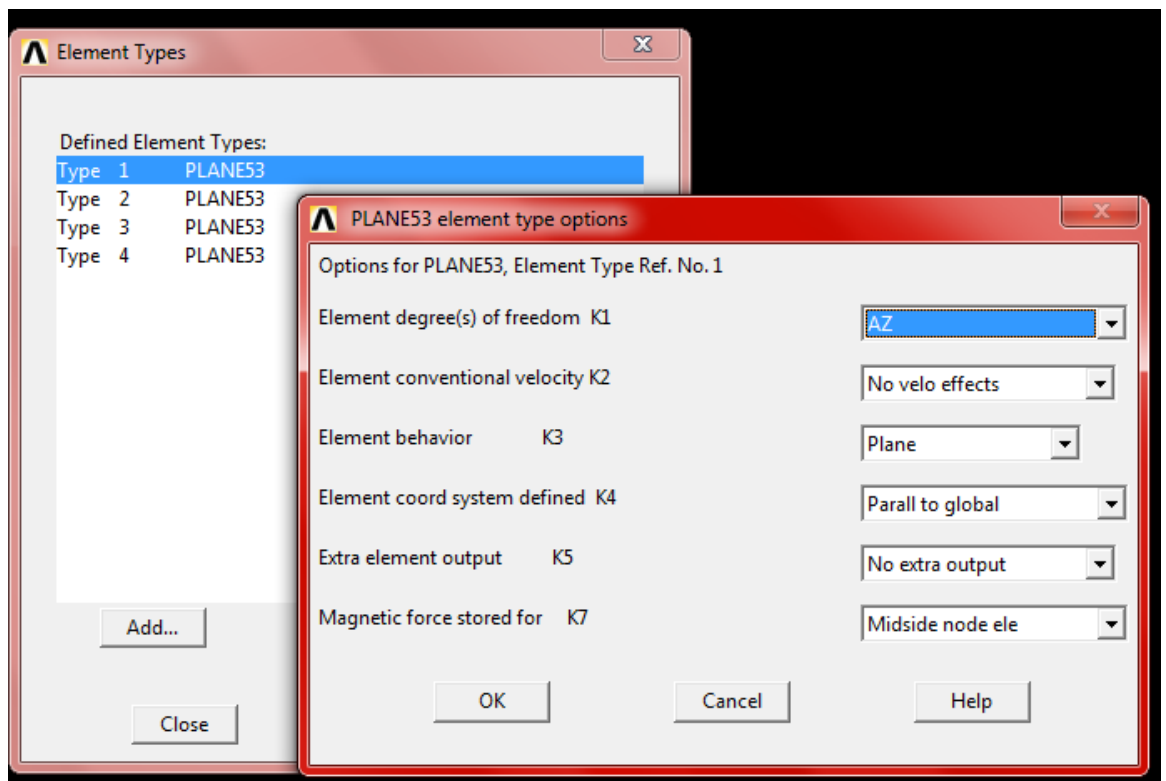


Obr. 3.3 Počítačový 2D model transformátoru

Pro představu velikosti transformátoru je jeho velikost 160 mm na šířku, 160 mm na výšku, šířka sloupků je 26 mm.

- **Volba atributů a zadávání materiálových vlastností**

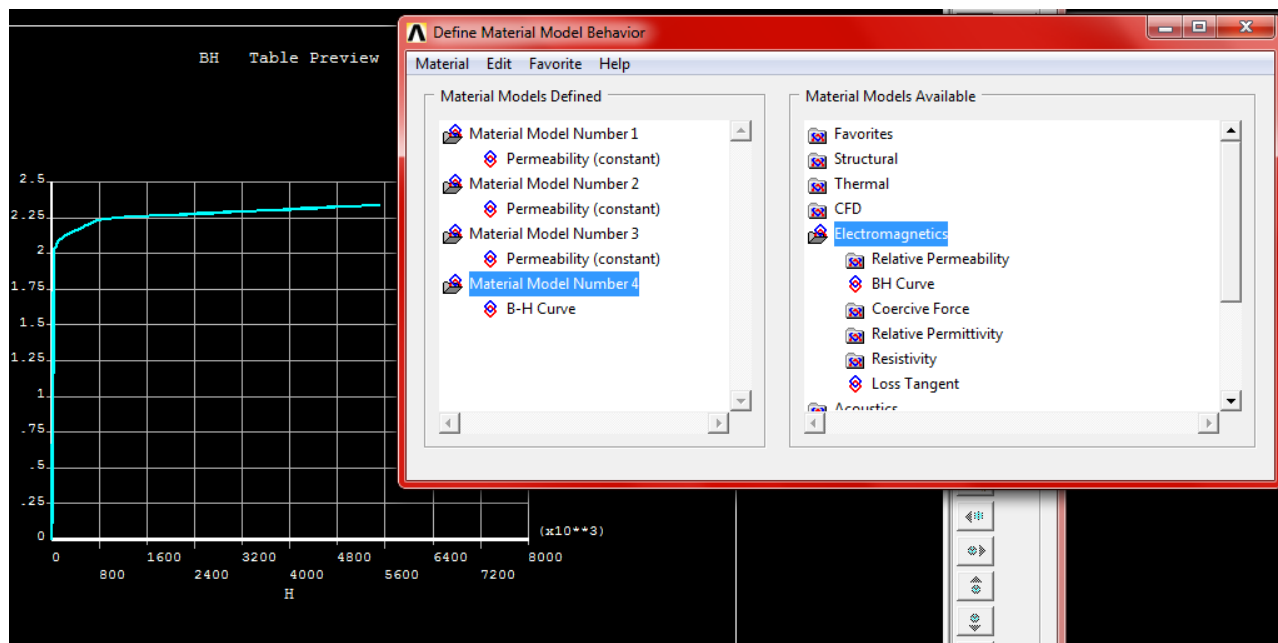
Zde jsou zadávány informace o materiálu, volí se typy elementů a tzv. real konstanty, které představují matematické vyjádření některých geometrických funkcí při volbě určitého elementu. Na obrázku 3.4 je printscreen z programu Ansys, kde jsou voleny typy elementů.



Obr. 3.4 Volba elementů

Na obrázku 3.4 je vidět, že je model rozdělen na 4 druhy elementů, přičemž všechny jsou jednoho druhu – Plane 53. Model je tedy rozdělen na 4 části – vzduchové okolí, primární vinutí (blíže k jádru), sekundární vinutí a jádro transformátoru.

Dalším krokem při modelování je zadání hodnot, které charakterizují určité vlastnosti materiálů. První je vzduch, který je definován permeabilitou o hodnotě 1 Hm^{-1} . Primární a sekundární vinutí modelu je charakterizované také permeabilitou o hodnotě 1 Hm^{-1} aby se předešlo zkreslení výsledků měření vířivými proudy. Poslední součástí modelu je jádro transformátoru, které je popsáno BH charakteristikou, vyobrazenou na obrázku 3.5.



Obr. 3.5 BH charakteristika a okénko s možností navolení vlastností materiálů

- **Zasíťování objektu – meshování, okrajové podmínky**

Jsou-li nadefinované materiály, je možné přistoupit k dalšímu kroku, který na modelu vytvoří síť – mesh. Zasíťováním objektu dojde k rozdělení na mnoho malých trojúhelníků, které mají danou velikost své hrany. Význam zasíťování je důležitý pro následné počítání výsledků a je na nich založena metoda konečných prvků. Následuje již jen nastavení okrajové podmínky pro vzduchové okolí, která zjednodušuje a urychluje výpočet.

- **Nastavení a výpočet proudových hustot**

Nejprve se proudová hustota musí vypočítat z naměřených hodnot. Plocha jednoho vinutí v řezu je $6,02 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. Proud, který protéká vinutím je známý, proto je možné vypočítat proudovou hustotu tak, že proud vydělíme plochou vinutí. Tuto vypočítanou hodnotu je možné použít pro modelování a je vypočítána v tabulce 3.3 Podle typu vybrané úlohy existují

různé způsoby zadávání proudových hustot. Při simulaci stavu naprázdno jsou napájena jen prostřední vinutí. Jedno vinutí je napájeno s kladnou polaritou, druhé se zápornou. Ostatní vinutí (boční sloupky) jsou rozepnuta – hodnota proudové hustoty je nula. Simulujeme-li případ, kdy žárovka svítí, na prostředním vinutí a obou postranních vinutích nastavíme proudovou hustotu podle tabulky 3.3. Stejně postupujeme i při simulaci stavu, kdy žárovka nesvítí, rozdíl je pouze v nastavení vinutí na straně kde je žárovka. Tam je hodnota proudové hustoty 0.

Tab 3.3 Proudové hustoty transformátoru

		J[A/m ²]			J[A/m ²]			J[A/m ²]
žárovka svítí	vstup	2093	žárovka nesvítí	vstup	558	Naprázdno	vstup	2000
	žárovka	631		žárovka	358		žárovka	0
	svorky	2059		svorky	0		svorky	0

3.3.2 Solution

Po části zvané pre-procesing následuje část zvaná solution. Zde probíhá volba typu analýzy (zda je statická, harmonická, transientní), výběr řešiče, který je vhodný pro daný typ úlohy a je optimalizován pro dané fyzikální pole a nastavuje se požadovaná přesnost výsledků. V našem případě se jedná o harmonickou analýzu o frekvenci 50 Hz a ostatní hodnoty a nastavení jsou volena automaticky. [13]

3.3.3 Post-procesing

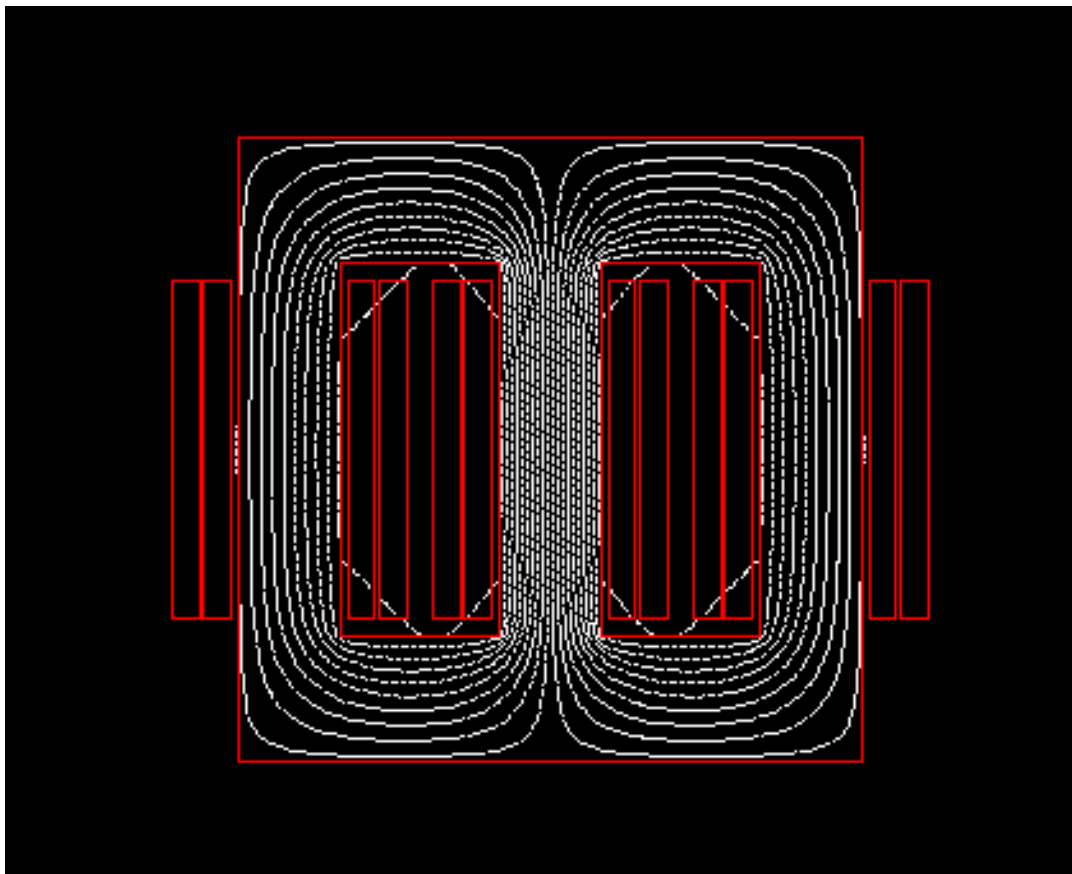
V této závěrečné fázi modelování se provádí samotné vyhodnocení modelované úlohy. Je velké množství možností, jakým lze interpretovat dosažené výsledky, z nichž nejpoužívanějšími je zobrazení mapy elektromagnetického pole, nebo vynesení závislosti elektromagnetických veličin na čase, frekvenci, teplotě a podobně. Interpretace výsledků ze simulovaných úloh v této práci budou zobrazeny v nové kapitole. [13]

4 Výsledky modelování

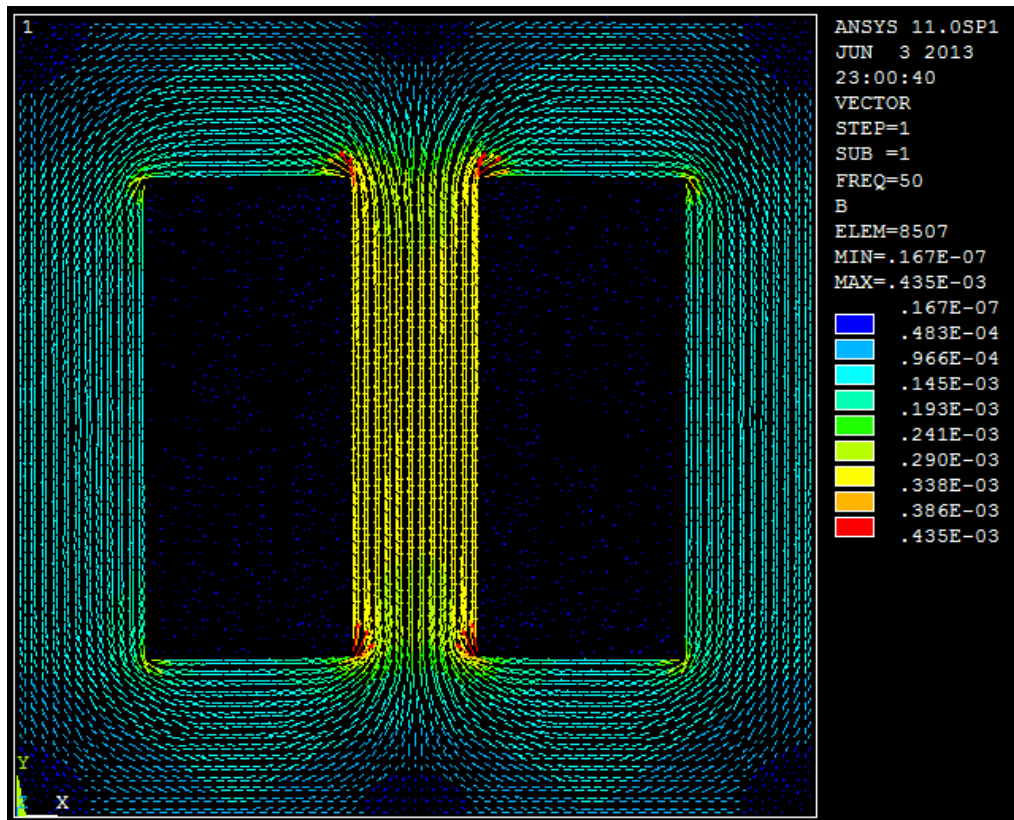
Jak již bylo napsáno v předchozí kapitole, je modelování magnetického pole transformátoru rozděleno na tři různé stavy transformátoru. Proto i vyhodnocení bude rozděleno podle jednotlivých stavů.

4.1 Stav - naprázdno

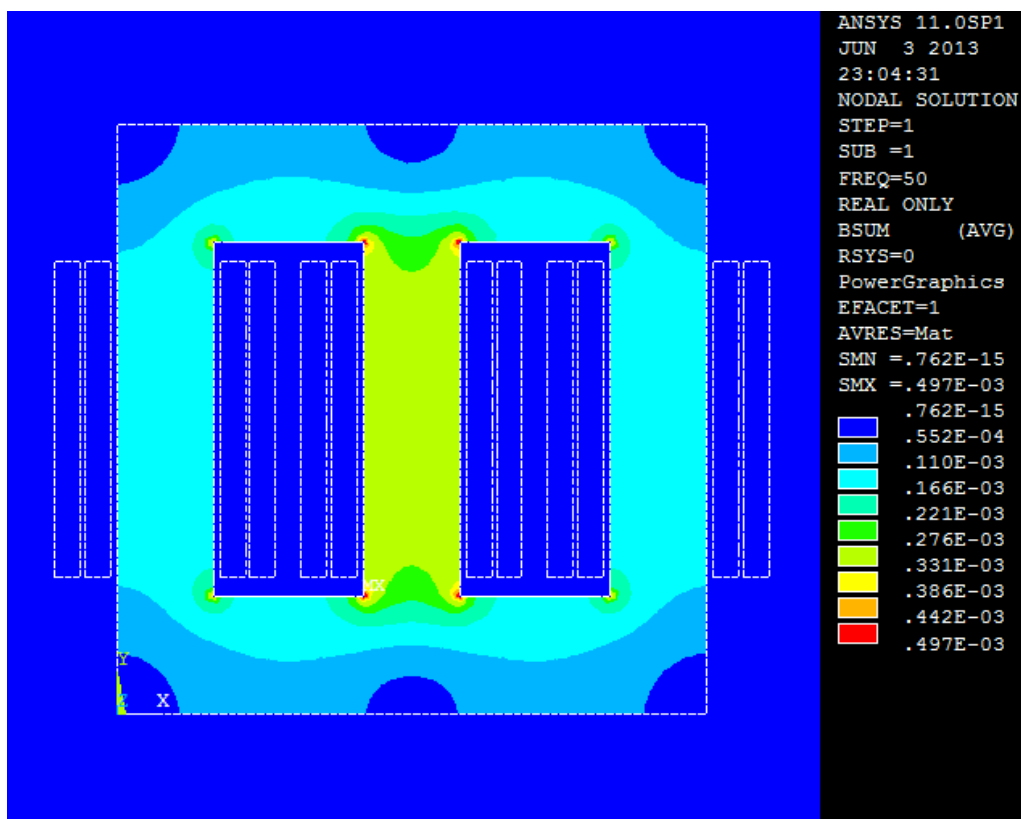
Tento stav představuje transformátor, který je pouze připojen k síti a není zatížen. Při modelování to znamenalo, že bylo napájeno pouze prostřední vinutí a obě postranní byla odpojena.



Obr. 4.1 Magnetické siločáry - naprázdno



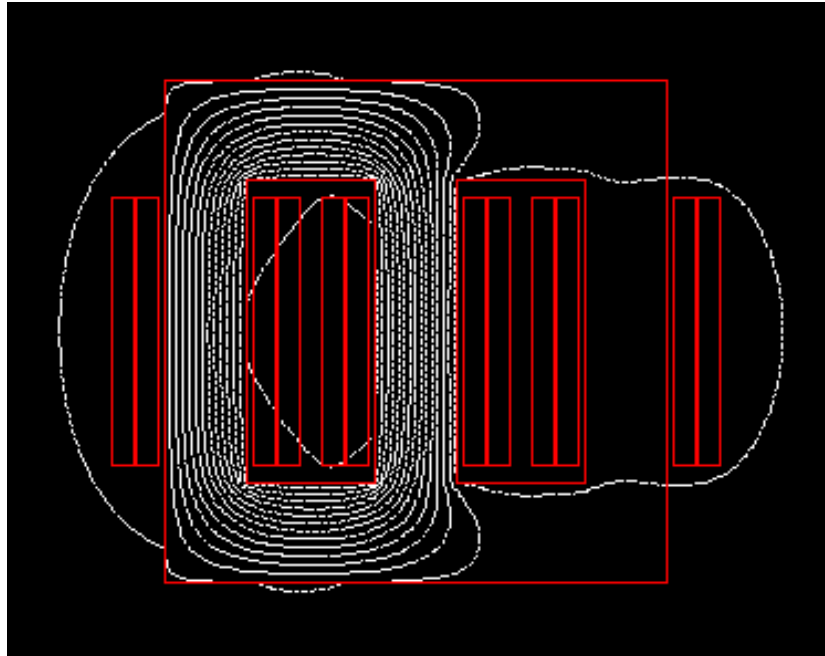
Obr. 4.2 Magnetická indukce – naprázdno



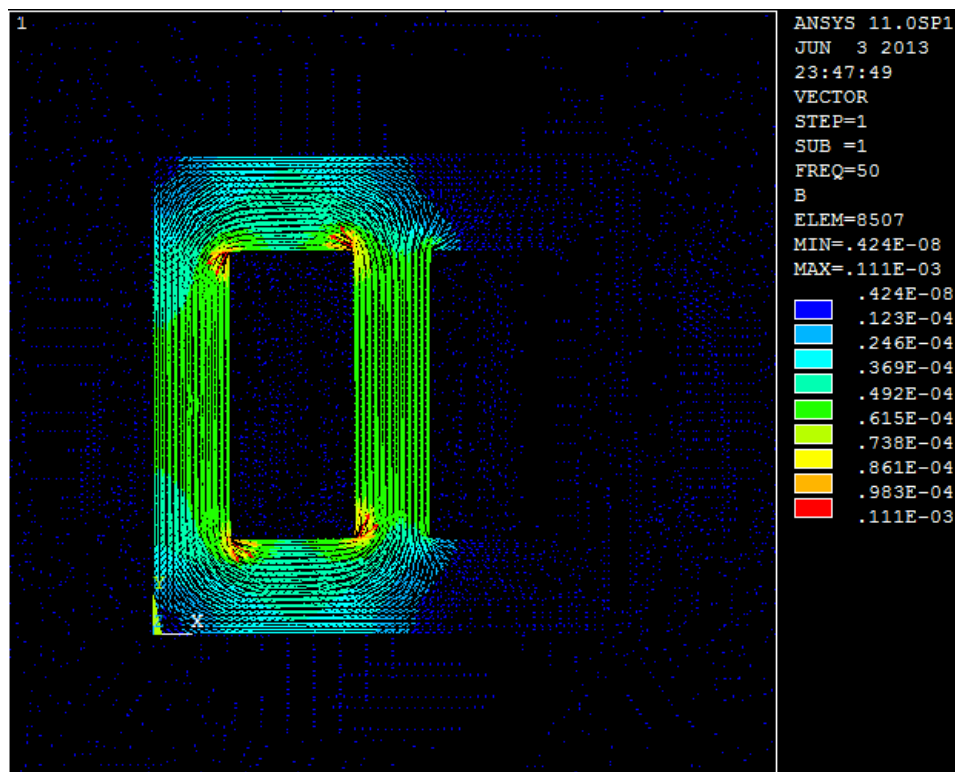
Obr. 4.3 Magnetická indukce - naprázdno

4.2 Stav – žárovka nesvítí

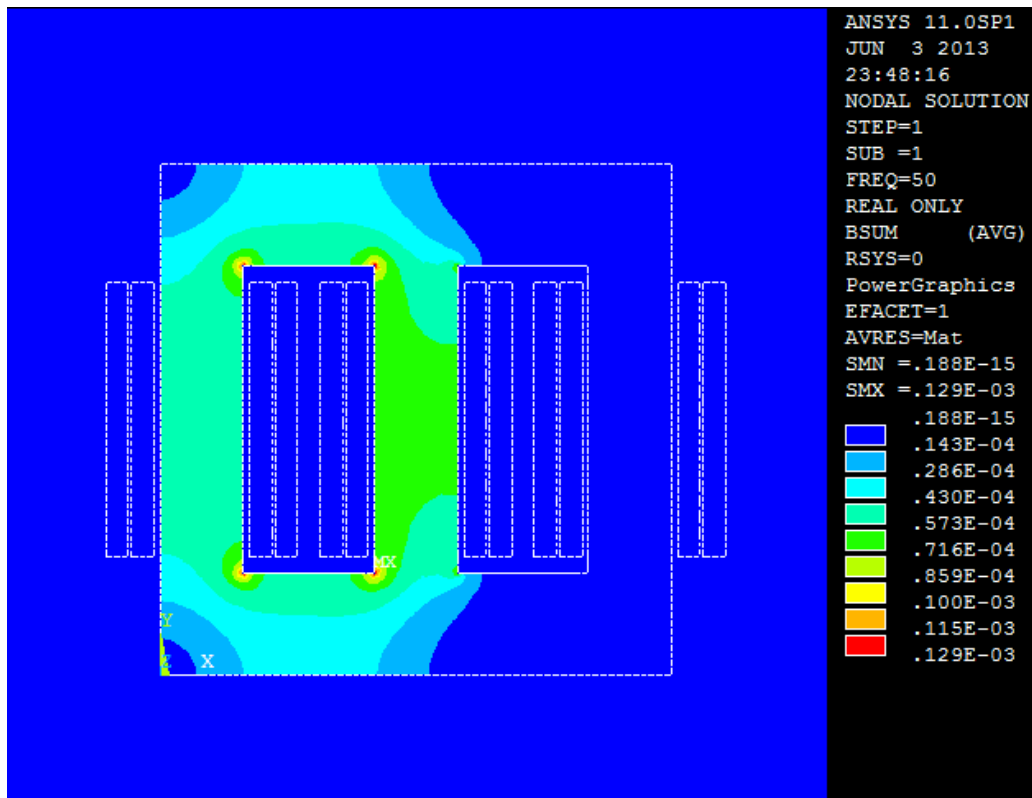
Stav, kdy připojená žárovka nesvítí představuje transformátor, který je připojen k síti a jeho levé sekundární vinutí je vyzkratováno. Na pravém vinutí je připojena žárovka, která díky vyzkratovanému levému vinutí nemá dostatek energie na to, aby se rozsvítila.



Obr. 4.4 Magnetické siločáry – žárovka nesvítí

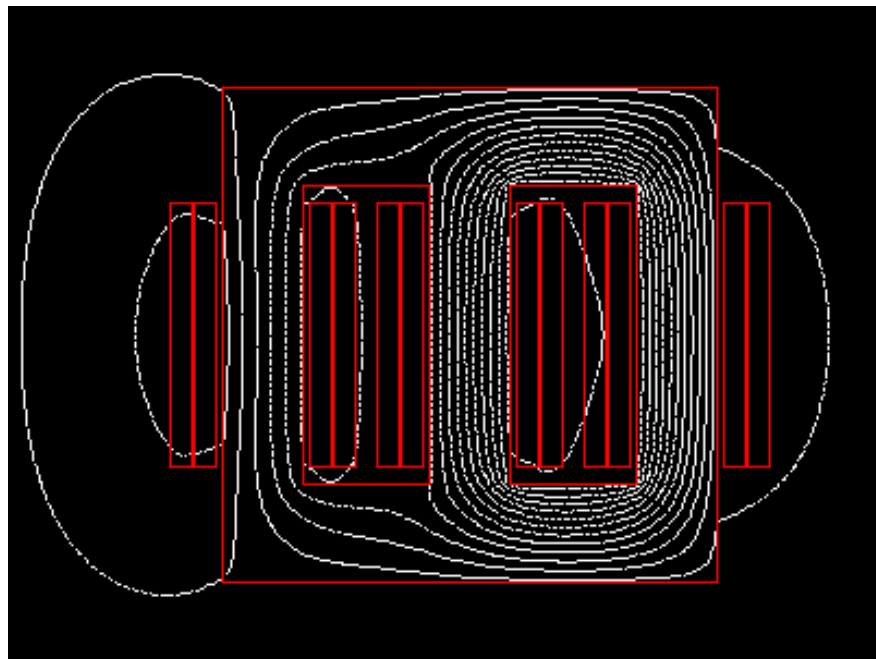


Obr. 4.5 Magnetická indukce – žárovka nesvítí



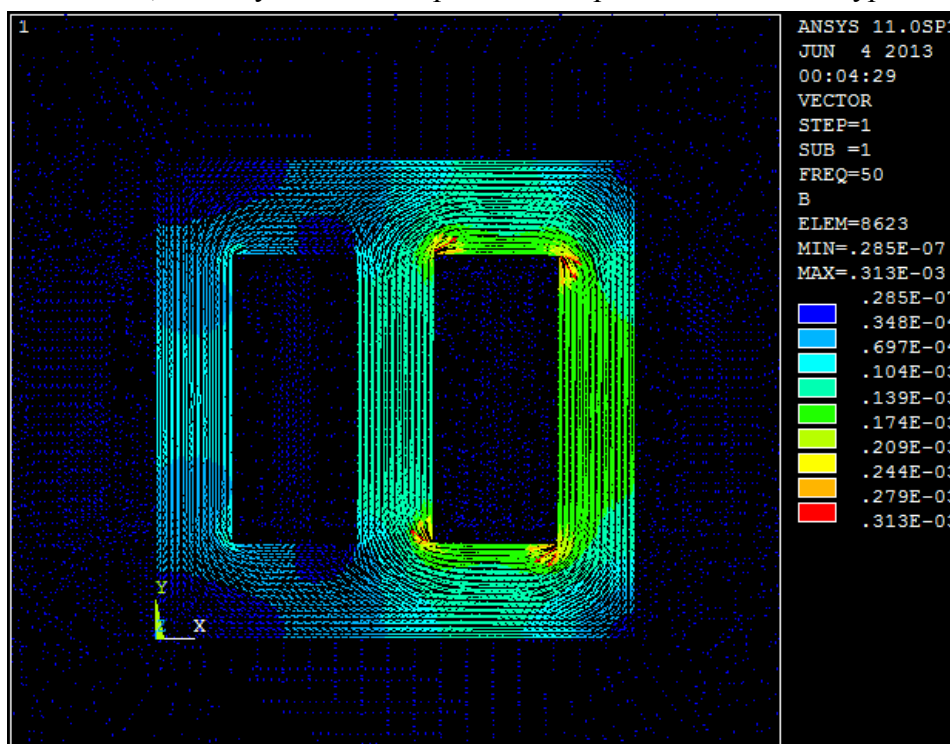
Obr. 4.6 Magnetická indukce – žárovka nesvíí

4.3 Stav – žárovka svítí

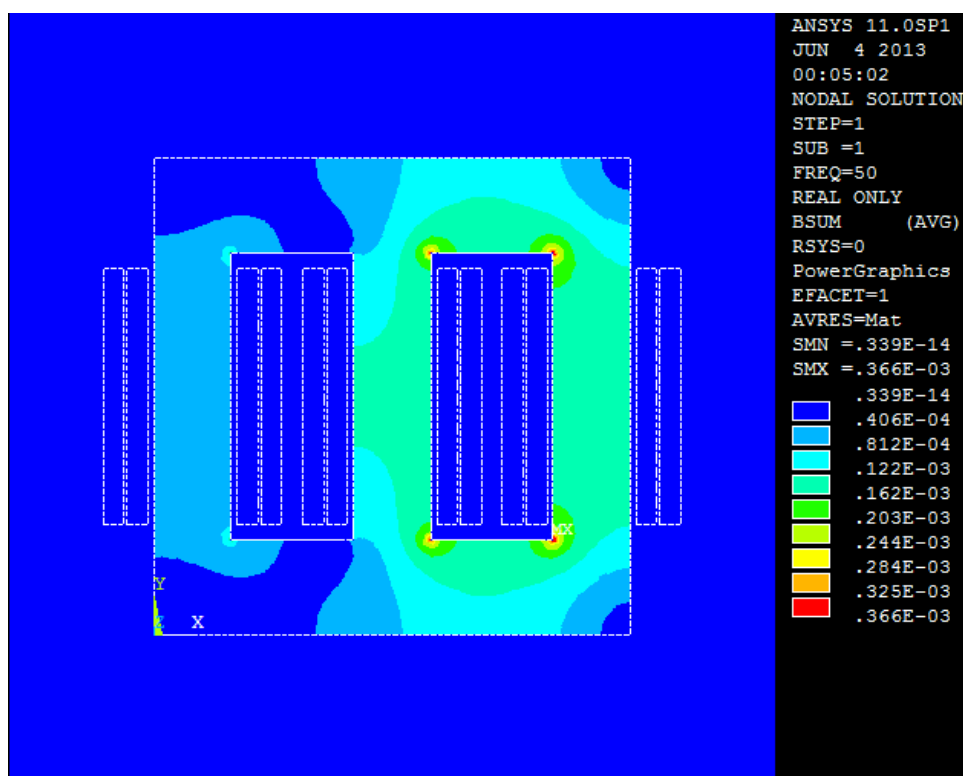


Obr. 4.7 Magnetické siločáry – žárovka svítí

Posledním modelovaným stavem byl stav, kdy připojená žárovka svítila. Při modelování to představovalo transformátor připojený k síti a obě sekundární vinutí byla napájena proudovou hustotou, která byla naměřena při simulaci pokusu a následně vypočítána.



Obr. 4.8 Magnetická indukce – žárovka svítí



Obr. 4.9 Magnetická indukce – žárovka svítí

Závěr

Když jsem si vybíral z velkého množství zadání bakalářských prací, vybral jsem si právě toto téma, neboť to nebylo téma jenom teoretické, ale i praktické. S prací jsem začal na podzim roku 2012, kdy bylo součástí předmětu MPS namodelovat a prezentovat elektrický stroj. Tento předmět mi hodně pomohl k napsání bakalářské práce, možná i proto, že jsem si z velké části modelování připravil už tam. Po novém roce jsem pomalu začal psát teorii a postupně od úvodu byly plněny ostatní stránky, až jsem se dostal až sem. První část bakalářské práce zahrnuje především teoretické poznatky o transformátoru a jsou zde shrnuta fakta o principu a funkci transformátoru, dále jsou zde popsána náhradní schémata a rovnice popisující chování transformátoru. To vše je součástí kapitoly první. Ve druhé kapitole jsem se věnoval magnetickému obvodu. Ten je zde popsán od rozdělení podle tvarů, podle použitých materiálů a částečně je zde popsán i pracovní postup při výrobě magnetických jader transformátoru. Můj největší přínos k této bakalářské práci přichází společně s kapitolou třetí. Po namodelování základního stavu transformátoru – stavu naprázdno jsem ještě modelování doplnil o pokus, který jsem našel na internetu. Tento pokus mi přišel jako zajímavý a bylo proveditelné i samotné namodelování na počítači v programu Ansys. Následovalo provedení pokusu v laboratoři, naměření potřebných hodnot a následně bylo zkoušeno ideální provedení pokusu, které by přehledně zobrazilo požadované stavy transformátoru. Pomocí naměřených hodnot byl vytvořen 2D model transformátoru v počítačovém programu Ansys, který se stal terčem útoku všech možných zatěžování a simulací. Nakonec jsem vybral tři stavy, které dle mého názoru hezky popisují chování transformátoru. Výsledky zobrazují transformátor naprázdno, druhý a třetí stav si pohrává se sycením transformátoru.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BARTOŠ, Václav et al. *Elektrické stroje*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006. 139 s. ISBN 80-7043-444-9.
- [2] Miniencyklopedie : Elektřina. [online]. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: http://www.cez.cz/encyklopedie_html/4-4.htm/rozv1
- [3] PETROV, Georgij N. *Elektrické stroje 1: úvod-transformátory*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1980. 385 s.
- [4] Toroidní transformátory. [online]. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://www.elektrov.cz/produkty/toroidni-transformatory.html>
- [5] FAKTOR, Zdeňek. *Transformátory a cívky*. Vyd. 1. Praha: BEN, 1999. 393 s. ISBN 80-86056-49-X
- [6] Elektrické stroje. [online]. s. 23 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/download/studium/vos/el-stroje-a-pristroje/transformatory.pdf>
- [7] BARTOŠ, Václav. *Teorie a měření elektrických strojů: laboratorní cvičení - měření*. 4. vyd. Plzeň: VŠSE, 1984. 153 s.
- [8] Prezentace VTP. [online]. s. 71 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: https://portal.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=65422
- [9] Trafoplech. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Trafoplech>
- [10] Transformátor. [online]. s. 30 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.sse-najizdarne.cz/dokumenty/BEDNAR/Elektro/Vypocet_TR.pdf
- [11] ECOM.CZ. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://www.ecom.cz/files/images-cache/TRFTdim_prew_600_0_color_fff.jpg
- [12] Metoda konečných prvků. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2013 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_kone%C4%8Dn%C3%BDch_prvk%C5%AF
- [13] KINDL, Vladimír. Modelování polí v elektrických strojích. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: https://portal.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=13491
- [14] Sběrka fyzikálních pokusů – Transformátor se dvěma sekundáry. [online]. s. 1 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://kdf.mff.cuni.cz/pokusy/uloha.php?uloha=902>

Přílohy

Příloha A - zdrojový kód z program Ansys pro model transformátoru naprázdno.

Ostatní případy se liší pouze zadávanou proudovou hustotou – označeno červeně

```
/PREP7
*SET,a,160e-3
RECTING, 0,a,0,a,
RECTING, 26e-3,67e-3,32e-3,128e-3,
RECTING, 93e-3,134e-3,32e-3,128e-3,
RECTING, -9e-3,-2e-3,37e-3,123e-3,
RECTING, -17e-3,-10e-3,37e-3,123e-3,
RECTING, 28e-3,35e-3,37e-3,123e-3,
RECTING, 36e-3,43e-3,37e-3,123e-3,
RECTING, 50e-3,57e-3,37e-3,123e-3,
RECTING, 58e-3,65e-3,37e-3,123e-3,
RECTING, 95e-3,102e-3,37e-3,123e-3,
RECTING, 103e-3,110e-3,37e-3,123e-3,
RECTING, 117e-3,124e-3,37e-3,123e-3,
RECTING, 125e-3,132e-3,37e-3,123e-3,
RECTING, 162e-3,169e-3,37e-3,123e-3,
RECTING, 170e-3,177e-3,37e-3,123e-3,,
RECTING, -80e-3,240e-3,-80e-3,240e-3,
APTN,all
!*
ET,1,plane 53
!*
ET,2,plane 53
!*
ET,3,plane 53
!*
ET,4,plane 53
!*
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,3,0
KEYOPT,1,4,0
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,7,0
!*
KEYOPT,2,1,0
KEYOPT,2,2,0
KEYOPT,2,3,0
KEYOPT,2,4,0
KEYOPT,2,5,0
KEYOPT,2,7,0
!*
KEYOPT,3,1,0
KEYOPT,3,2,0
KEYOPT,3,3,0
KEYOPT,3,4,0
KEYOPT,3,5,0
KEYOPT,3,7,0
!*
KEYOPT,4,1,0
KEYOPT,4,2,0
KEYOPT,4,3,0
KEYOPT,4,4,0
KEYOPT,4,5,0
```

```
KEYOPT,4,7,0
!*
!*
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,MURX,1,,1
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,MURX,2,,1
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,MURX,3,,1
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0

TB,BH,4,1,15,
TBTEMP,0
TBPT,,10000,0.5
TBPT,,20000,1
TBPT,,30000,1.5
TBPT,,40000,2
TBPT,,50000,2.02
TBPT,,70000,2.04
TBPT,,100000,2.08
TBPT,,250000,2.13
TBPT,,500000,2.18
TBPT,,750000,2.23
TBPT,,1000000,2.25
TBPT,,2000000,2.27
TBPT,,3000000,2.29
TBPT,,4000000,2.31
TBPT,,5000000,2.33
aplot
FLST,5,3,5,ORDE,2
FITEM,5,18
FITEM,5,-20
CM,_Y,AREA
ASEL, , , P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 1, , 1, 0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
CM,_Y,AREA
ASEL, , , 17
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 4, , 4, 0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,6,5,ORDE,6
```

```
FITEM,5,4
FITEM,5,6
FITEM,5,9
FITEM,5,-10
FITEM,5,13
FITEM,5,-14
CM,_Y,AREA
ASEL, , , P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 2, , 2, 0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,6,5,ORDE,6
FITEM,5,5
FITEM,5,7
FITEM,5,-8
FITEM,5,11
FITEM,5,-12
FITEM,5,15
CM,_Y,AREA
ASEL, , , P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 3, , 3, 0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
ESIZE,0.0025,0,
MSHAPE,1,2D
MSHKEY,0
!*
FLST,5,16,5,ORDE,4
FITEM,5,4
FITEM,5,-15
FITEM,5,17
FITEM,5,-20
CM,_Y,AREA
ASEL, , , P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
!*
ANTYPE,3
HARFRQ,0,50,
NSUBST, ,
KBC,0
```

```
!*
FLST,2,4,4,ORDE,2
FITEM,2,61
FITEM,2,-64
DL,P51X, ,AZ,0,0,
aplot
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,5
!*
BFA,P51X,JS, , ,0,0
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,7
!*
BFA,P51X,JS, , ,-0,0
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,8
!*
BFA,P51X,JS, , ,2000,0
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,11
!*
BFA,P51X,JS, , ,-2000,0
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,12
!*
BFA,P51X,JS, , ,0,0
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,15
!*
BFA,P51X,JS, , ,-0,0
FINISH
/SOL
!*
ANTYPE,3
HARFRQ,0,50,
NSUBST, ,
KBC,0
!*
solve
FINISH
```