

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra výkonové elektroniky a strojů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Stínění magnetického toku výkonových transformátorů

Autor práce: **Ondřej Klouda**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej KLOUDA**
Osobní číslo: **E20N0037P**
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**
Specializace: **Elektrické stroje**
Téma práce: **Stínění magnetického toku výkonových transformátorů**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Popište principy stínění magnetického toku užívané ve výkonových transformátorech.
2. Proveďte analytický výpočet.
3. Proveďte simulaci pomocí numerických metod.
4. Podle možností verifikujte experimentálně.
5. Shrňte dosažené výsledky, vyvoďte závěry a doporučte obecné zásady pro optimální návrh.



Rozsah diplomové práce: **40-60**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

William M. Flanagan: Handbook of transformers – Design and Application. McGraw Hill 1992. ISBN 0-07-021291-0.
S.V.Kulkarni, S.A. Khaparde: Transformer Engineering Design and Practice. Marcel Dekker, Inc. 2004.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.**
Katedra výkonové elektroniky a strojů

Datum zadání diplomové práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2022**



L.S.

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

Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Cílem této práce je posouzení magnetického stínění připevněného na vnitřní stranu transformátorové nádoby. Pro ověření byla využita naměřená data získaná při zkoušce nakrátko se sníženým napájecím proudem, při které se měřilo naindukované napětí na provizorních cívkách navinutých na stínítkách a dále analýza konečných prvků pro variantu bez a se stíněním v programu ANSYS maxwell. Využitím analytického výpočtu byl pro porovnání vypočítán ještě rozptylový magnetický tok uzavírající se skrze stínítko číslo čtyři. Součástí práce je také teoretická část, která se zabývá obecně magnetickým tokem, tím, co tento tok způsobuje a jeho stíněním.

Klíčová slova

Proud, napětí, indukce, rozptylový magnetický tok, hlavní magnetický tok, ztráty, ANSYS maxwell, model, transformátor, zkouška nakrátko, stínění, magnetické stínění, elektrické stínění, magnetický obvod, cívka, primární vinutí, sekundární vinutí, terciální vinutí

Abstract

The aim of this thesis is to assess the magnetic shield attached to the inside of the transformer vessel. The measured data obtained through the short circuit test with reduced supply current were used for verification, during which the induced voltage on the temporary coils wound on the shunts was measured, and finite element analysis for the variant without and with magnetic shielding in the ANSYS maxwell program. Using the analytical calculation, stray magnetic flux closing through the number four shunt was calculated for comparison. This thesis also includes the theoretical part, which deals the general magnetic flux, what causes this flux and its shielding.

Key Words

Current, voltage, induction, stray magnetic flux, main magnetic flux, losses, ANSYS maxwell, model, transformer, short circuit test, shielding, magnetic shielding, eddy current shielding, magnetic circuit, coil, primary winding, secondary winding, tertiary winding

Poděkování

Mé poděkování patří váženému panu doc. Ing. Bohumilu Skalovi, Ph.D. a panu Ing. Michalovi Svobodovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce, cenné profesionální rady, trpělivost a ochotu při konzultacích. Také bych chtěl poděkovat celé firmě ETD Transformátory a.s., která umožnila vznik mé práce.

Tato práce vznikla za podpory projektu SGS 2021-021.

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Obecné informace o transformátoru	- 2 -
1.1 Konstrukce	- 3 -
1.1.1 Magnetický obvod	- 3 -
1.1.2 Vinutí	- 7 -
1.2 Magnetický tok.....	- 8 -
1.2.1 Hlavní magnetický tok.....	- 9 -
1.2.2 Rozptylový magnetický tok	- 9 -
1.3 Stínění.....	- 10 -
1.3.1 Magnetické stínění	- 11 -
1.3.2 Elektrické stínění	- 13 -
1.4 Ztráty	- 14 -
1.4.1 Ztráty ve vinutí.....	- 15 -
1.4.2 Ztráty v železe.....	- 17 -
1.4.3 Přídavné ztráty v kovových konstrukčních částech.....	- 18 -
1.5 Použití.....	- 18 -
2 Provedení transformátoru	- 19 -
2.1 Transformátor.....	- 19 -
2.1.1 Magnetický obvod	- 20 -
2.1.2 Vinutí	- 21 -
2.1.3 Nádoba	- 22 -
2.1.4 Chlazení	- 23 -
2.1.5 Stínítka	- 23 -
3 Praktické výsledky.....	- 24 -
3.1 Analytický výpočet rozptylového magnetického toku.....	- 24 -
3.2 Analýza elektromagnetického pole	- 27 -
3.2.1 Transformátor bez magnetického stínění.....	- 29 -
3.2.2 Transformátor s magnetickým stíněním typu edge-wise shunt	- 33 -

3.3 Měření transformátoru nakrátko.....	- 41 -
Zhodnocení a závěr.....	- 46 -
Literatura.....	- 49 -
Přílohy.....	I

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
vn	Vysoké napětí	
nn	Nízké napětí	
PEI	Index špičkové účinnosti	
TN	Terciální napětí	
LI	Napětí pro zkoušku rázovým impulzem	(V)
U_{pm}	Maximální provozní napětí	(V)
u_k	Napětí nakrátko	(%)
i_0	Proud naprázdno	(%)
ΔP_0	Ztráty naprázdno v transformátoru	(W)
ΔP_k	Ztráty nakrátko v transformátoru	(W)
ΔP_{celk}	Celkové ztráty transformátoru	(W)
FEM	Metoda konečných prvků (Finite element method)	
EMI	Electromagnetic interference	
k	Převod transformátoru	(-)
B	Magnetická indukce	(T)
Φ	Magnetický tok	(Wb)
u_i	Indukované napětí	(V)
t	Čas	(s)
P_{t1}	Výkon transformátoru s nižším výkonem	(W)
P_{t2}	Výkon transformátoru s vyšším výkonem	(W)
ΔP_{t1}	Ztráty transformátoru s nižším výkonem	(W)
ΔP_{t2}	Ztráty transformátoru s vyšším výkonem	(W)
S_{chl1}	Chladicí plocha transformátoru s nižším výkonem	(m ²)
S_{chl2}	Chladicí plocha transformátoru s vyšším výkonem	(m ²)
P_1	Výkon na primární straně transformátoru	(W)
P_2	Výkon na sekundární straně transformátoru	(W)
$\cos(\varphi)$	Účinník	(-)
N_1	Počet závitů na primární straně transformátoru	(závity)
N_2	Počet závitů na sekundární straně transformátoru	(závity)
U_1	Velikost napětí na primární straně transformátoru	(V)
U_2	Velikost napětí na sekundární straně transformátoru	(V)
I_1	Velikost proudu na primární straně transformátoru	(A)
I_2	Velikost proudu na sekundární straně transformátoru	(A)
R_m	Magnetický odpor (reluktance)	(H ⁻¹)
R_{p11}	Odpor jednoho masivního plechu	(Ω)
R_{p12}	Odpor svazku tří plechů na sobě	(Ω)
S_1	Plocha jednoho masivního plechu	(m ²)
S_2	Plocha tří plechů ze svazku	(m ²)
l_1	Délka jednoho masivního plechu	(m)
l_2	Délka tří plechů ze svazku	(m)
ρ	Hustota	(kg/m ³)
ΔP_{jAC}	Jouleovy ztráty	(W)
R_{1AC}, R_{2AC}	Efektivní odpor primárního a sekundárního vinutí	(Ω)
R_{1DC}, R_{2DC}	Odpor primárního a sekundárního vinutí měřený pro DC proud	(Ω)
k_1, k_2	Součinitel přidavných ztrát primárního a sekundárního vinutí	(-)
ΔP_{jd}	Přídavné ztráty vinutí	(W)
ρ	Měrný odpor (rezistivita)	(Ωm)

δ_s	Hloubka vniku při skinefektu	(m)
f	Frekvence	(Hz)
μ	Permeabilita	(H/m)
R_p	Činný odpor p-té větve	(Ω)
I_{cp}	Cirkulační (vyrovnávací) proud p-té větve	(A)
E_{str}	Aritmetický průměr efektivních elektromotorických sil (napětí)	(V)
E_p	Efektivní elektromotorická síla (napětí) p-té větve	(V)
$E_{r\ str}$	E_{str} naindukovaný pouze rozptylovým mag. tokem	(V)
$E_{r\ p}$	E_p naindukovaná pouze rozptylovým mag. tokem	(V)
ΔP_{Fe}	Ztráty v železe	(W)
$\Delta P_{Fe\ h}$	Ztráty hysterezní v železe	(W)
$\Delta P_{Fe\ v}$	Ztráty vířivými proudy v železe	(W)
B	Magnetická indukce	(T)
SE	Účinnost stínění	(dB)
RE	Útlum odrazem (Reflexí)	(dB)
Ab	Útlum absorpcí	(dB)
Mn	Útlum mnohonásobným odrazem	(dB)
t_s	Tloušťka stínítka	(m)
ω	Úhlová frekvence	(rad/s)
μ_r	Relativní permeabilita	(-)
ϵ_0	Permitivita vakua	(F/m)
σ	Měrná elektrická vodivost (konduktivita)	(S/m)
Z_0	Charakteristická impedance vzduchu	(Ω)
Z_M	Charakteristická impedance stínění	(Ω)
ST_{min}	Minimální tloušťka magnetického stínítka	(m)
C	Vzdálenost mezi stranou jádra a středem mezi vinutím vn a nn	(m)
T	Vzdálenost mezi stranou nádoby a středem mezi vinutím vn a nn	(m)
h	Výška cívky	(m)
m	Počet fází	(-)
S_n	Jmenovitý zdánlivý výkon	(VA)
PEI_{min}	Minimální index špičkové účinnosti	(%)
h_s	Vzdálenost od spodní hrany plechů stínítka	(m)
U_{is}	Indukované napětí do cívek na stínítku	(V)
S_s	Průřez stínítka	(m ²)
N_s	Počet závitů cívek navinutých na stínítkách	(-)
$\Delta P_{Nádoba}$	Ztráty v nádobě transformátoru	(W)
$\Delta P_{Stínítka}$	Ztráty v plechách stínítek	(W)
ΔP_{Celk}	Součet ztrát v nádobě a v plechách stínítek	(W)
I_n	Jmenovitý proud	(A)
δ_{red}	Redukovaná šířka kanálu	(m)
b_1	Tloušťka primárního vinutí	(m)
b_2	Tloušťka sekundárního vinutí	(m)
b_{1kmen}	Tloušťka kmene primárního vinutí	(m)
$b_{1hrubýStupen}$	Tloušťka hrubého stupně primárního vinutí	(m)
δ	Mezera mezi hranami primárního a sekundárního vinutím	(m)
$\Phi_{1\sigma}$	Rozptylový magnetický tok vybuzený proudem $I_{1,0,6n}$	(Wb)
B_σ	Amplituda rozptylové magnetické indukce	(T)
S_σ	Plocha rozptylového magnetického toku	(m ²)
$I_{1,0,6n}$	Snížený proud na hodnotu 60% jmenovité hodnoty	(A)
O_{med}	Střední obvod kanálu mezi vinutími	(m)

r_{med}	Střední poloměr kanálu mezi vinutími	(m)
μ_0	Permeabilita vakua	(H/m)
R_{mi}	Magnetický odpor cesty k i-tému stínítku	(1/H)
l_{si}	Vzdálenost mezi vinutím a i-tým stínítkem	(m)
S	Průřez kanálu pro tok uzavírající se skrze stínítko	(m ²)
Φ_{st4}	Rozptylový tok uzavírající se skrze čtvrté stínítko	(Wb)
r_{medp}	Střední poloměr uvažované části primárního vinutí	(m)
O_{medp}	Střední obvod kanálu uvažované části primárního vinutí	(m)

Úvod

K tématu mé diplomové práce jsem se doslal díky brigádě ve společnosti ETD TRANSFORMÁTORY a.s., kde mi vyšli vstříc a umožnili spolupráci. Zадáním práce bylo zpracovat teorii týkající se stínění transformátorů a potvrdit ji na základě provedených simulací, měření a analytického výpočtu. Stínění bude zkoumáno na 3f olejovém transformátoru, k němuž mi byla poskytnuta výkresová dokumentace a data ze zkoušky nakrátko, která byla provedena ve zkušebně této společnosti.

Práce bude rozdělena do tří kapitol. První kapitola se bude zabývat teoretickou částí dané problematiky, v druhé kapitole bude popsána konstrukce samotného transformátoru a v poslední bude řešena samotná praktická část, ve které se budu zabývat analytickým výpočtem, měřením nakrátko na transformátoru a simulací s využitím výpočetního programu ANSYS maxwell. Pro tuto simulaci bude potřeba vytvořit dvě geometrie olejového transformátoru, kdy součástí prvního modelu bude alespoň magnetický obvod, cívky, transformátorová nádoba a stínítka připevněná na ni. Z důvodu možnosti porovnání velikosti ztrát a způsobu uzavírání rozptylového magnetického toku nebude druhý model obsahovat magnetické stínění. Na této dvojici budou simulace provedeny dvakrát s využitím odlišného způsobu napájení primárního a zatížení sekundárního vinutí. V prvním případě bude sekundární vinutí zatíženo RL zátěží a transformátorem bude protékat jmenovitý proud a v druhém případě bude sekundární vinutí vyzkratováno a primárním vinutím bude protékat 60 % jmenovitého proudu.

Cílem této diplomové práce je ověření nutnosti využití stínění rozptylového magnetického toku, které způsobuje snížení přídatných ztrát. Jelikož celkové ztráty v transformátorech v Evropě dříve nabývaly velkých hodnot, což snižovalo přenášený výkon, proto bylo za účelem zlepšení situace vytvořeno nařízení komise (EU) č. 548/2014, které stanovuje pevné maximální dovolené limity na účinnost a tím i ztráty transformátorů. Důvodem je především to, že evropská společnost se v posledních letech intenzivně zajímá o ekologii, udržitelný rozvoj a výrobu elektrické energie za využití obnovitelných zdrojů.

V práci bude z dat získaných ze simulací zkoumána velikost úspory energie za využití magnetického stínění, dále způsob uzavírání rozptylového magnetického toku a zda se rozptylový tok uzavírá převážně skrze stínítka namísto nádoby. Data získaná simulací budou verifikována s experimentálně získanými výsledky díky měření nakrátko na transformátoru a analytickým výpočtem.

1 Obecné informace o transformátoru

Transformátory jsou elektrická zařízení, která spadají z konstrukčního hlediska mezi netočivé elektrické stroje. Princip jejich činnosti spočívá v tom, že pokud je připojeno primární vinutí transformátoru ke střídavému zdroji, tak jím započne protékat elektrický proud, který vybudí magnetické pole o určité magnetické indukci a magnetickém toku. Většina tohoto vybuzeného magnetického toku se započne uzavírat skrze jádro z magneticky vodivého materiálu, na kterém je sekundární vinutí, jež je navinuto na stejném magnetickém obvodu jako i primární vinutí. Tento tok, jelikož byl vybuzen střídavým elektrickým proudem, je taktéž střídavého charakteru a díky tomu se může dle Faradayova indukčního zákona (1.1) naindukovat do sekundárního vinutí indukované napětí. Pokud se na sekundární vinutí připojí zátěž, tak jím začne protékat i elektrický proud. Jednoduše řečeno, transformátor je zařízení, které využívá přeměny elektrické energie na magnetickou energii a následně tuto energii přemění zpět na energii elektrickou. Díky tomu dochází ke galvanickému oddělení primárního a sekundárního vinutí.

$$u_i = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1)$$

Velikost napětí na sekundárním vinutí je závislá na velikosti vstupního napětí a počtu závitů primární i sekundární strany. Transformátor využívá také zákon zachování energie, jelikož výkon na primární a sekundární straně při zanedbání ztrát musí být stejný. Tak dochází při transformaci napětí nahoru k tomu, že proud se transformuje dolů, což je vysvětleno ve vzorci (1.2). Tohoto jevu se využívá například pro potlačení Jouleových ztrát ve vedení při přenosu elektrické energie, jelikož tyto ztráty jsou závislé na kvadrátu elektrického proudu.

$$\begin{aligned} P_1 &= P_2 \\ m \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi) &= m \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi) \\ \frac{U_1}{U_2} &= \frac{I_2}{I_1} \\ \frac{U_1}{U_2} &= \frac{\frac{R_m \cdot \Phi}{N_2}}{\frac{R_m \cdot \Phi}{N_1}} = \frac{1}{\frac{N_2}{N_1}} = \frac{N_1}{N_2} \\ \frac{U_1}{U_2} &= \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = k \end{aligned} \quad (1.2)$$

1.1 Konstrukce

Transformátory můžeme dle jejich konstrukce dělit pomocí několika kritérií, a to například dle počtu fází, tvaru jádra, uložení vinutí anebo způsobu chlazení. Pokud budeme transformátory dělit dle počtu fází, tak se vyrábějí 1f anebo 3f. Ohledně ceny a účinnosti je lepší variantou jeden 3f transformátor nežli tři 1f transformátory, ale najdou se aplikace, kdy z důvodu například složitosti přepravy nebo hmotnosti je vhodnější využít tři 1f transformátorů.

Pokud budeme transformátory dělit dle jejich chlazení, tak prvním kritériem je chladící médium vinutí, které je buď vzduchové anebo olejové. Druhým kritériem je intenzita odvádění tepla, díky které můžeme transformátory rozdělit na transformátory s nuceným či přirozeným chlazením. Následnou kombinací těchto kritérií vzniká několik chladících variant transformátorů, které udává norma ČSN IEC 60076-2, jako je například AN, AF, ONAN, ONAF, OFAN, OFAF a OFWF. Pod prvním písmenem se skrývá médium, které ochlazuje aktivní části transformátoru (vinutí a magnetický obvod), vzduch se značí A a O je olej. Druhé a čtvrté písmeno popisuje intenzitu odvádění tepla pro předchozí písmeno, N značí přirozené chlazení a F nucené chlazení. Písmeno na třetí pozici A popisuje, že nádoba transformátoru anebo chladiče je ochlazována vzduchem a písmenem W je myšleno, že olej přivedený do chladičů je ochlazován za pomoci vody a nikoli vzduchu. U transformátorů větších výkonů je potřeba využívat komplikovanějších a důmyslnějších způsobů nuceného chlazení, jelikož jak vyplývá ze vzorce (1.3), tak poměr poměrné plochy stěn, přes které se odvádí teplo do okolí, ku poměrným ztrátám vznikajících v transformátoru při narůstajícím výkonu, klesá. Z toho vyplývá, že s narůstajícím výkonem je odvedeno do okolí přes stěny transformátoru menší procento ztrát a pokud by nebylo použito důmyslnějšího způsobu nuceného chlazení, tak by docházelo k přehřívání transformátoru. [1, str. 459-460]

$$\frac{\Delta P_{t2}}{\Delta P_{t1}} = \sqrt[4]{\left(\frac{P_{t2}}{P_{t1}}\right)^3} \quad (1.3)$$

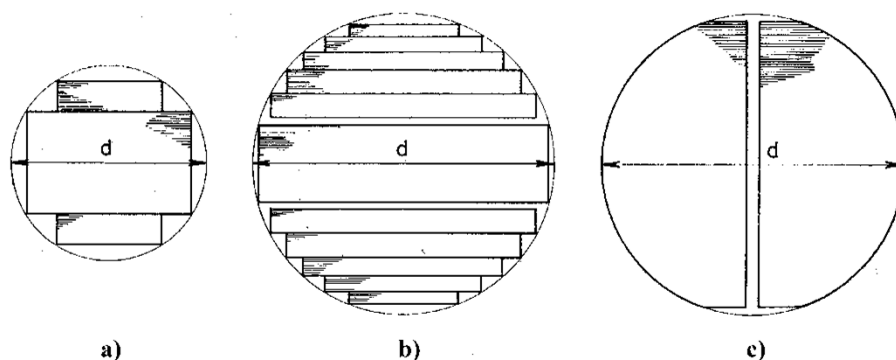
$$\frac{S_{chl2}}{S_{chl1}} = \sqrt{\frac{P_{t2}}{P_{t1}}}$$

1.1.1 Magnetický obvod

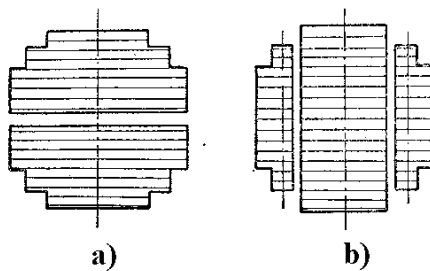
Magnetické obvody můžeme dělit na jádrové a plášťové. Jádrové transformátory můžeme dle zdroje [1, str. 189-190] dále rozdělit na symetrické (spojky do dvojité hvězdy anebo

spojky do trojúhelníku) a nesymetrické, které jsou nejrozšířenější, a jejich název vyplývá z nesymetrie fázových magnetizačních proudů. Dále můžeme také, dle zdroje [2, str. 138] rozdělit plášťové transformátory na stojaté (vertikální) a ležaté (horizontální), kdy u nás je běžnější stojatá varianta plášťového transformátoru. Výhodou plášťového provedení jsou menší rozptylové toky a tím pádem i menší úbytky, což způsobuje při změně zátěže menší kolísání napětí na sekundární straně. To dělá z plášťových transformátorů tvrdší zdroje oproti jádrovým, které mají větší rozptylové toky [5, str. 25]. Magnetický obvod společně s vinutím transformátoru spadá mezi nejdůležitější aktivní části z hlediska funkce transformátoru. Magnetický obvod se skládá ze svislých sloupků, kterým se jinak říká jádra a z vodorovných spojek, které propojují jádra mezi sebou. Přes tyto spojky se umístí stahovací konstrukce, která má za úkol stáhnout magnetický obvod. Jádra (sloupky) transformátoru lze také stahovat za pomoci bandáže. Magnetický obvod je složen z navzájem izolovaných plechů, do kterých je přidáván křemík, čímž jsme schopni omezit vířivé proudy, které se do těchto plechů indukují kvůli střídavému magnetickému poli a tím i ztráty v železe. Transformátorové plechy se využívají hlavně válcované za studena, anebo válcované za tepla. Plechy válcované za studena mají tu výhodu, že ve směru válcování mají malý magnetický odpor, což se využívá při seskládání magnetického obvodu tak, aby magnetický tok procházel skrze plechy ve směru malého magnetického odporu. Další výhodou je činitel plnění, který je lepší, než mají válcované plechy za tepla, což je zapříčiněno hladkými plochami. Tvary transformátorových plechů jsou získávány ražením z ocelových svitků. Tyto pláty mají většinou tloušťku 0,23 mm až 0,27 mm, ale jak udává zdroj [11], tak se vyrábějí orientované plechy o tloušťkách v rozmezí od 0,1 do 0,35 mm. Získané tvary transformátorových plechů, ze kterých se skládají feromagnetická jádra, jsou například tvaru M, I, L a E. [3, str. 106-107] Při skládání plechů (spojení sloupků za pomoci spojek) se využívají dvě techniky, které jsou vidět na *Obr. 3*, a to s tupým stykem anebo přeplátováním. Magnetické obvody s tupým stykem se využívají například u tlumivek, ovšem pro konstrukci transformátorů se využívají přeplátované magnetické obvody, a to z důvodu omezení vířivých proudů ve styku plechů, které jsou zapříčiněny překryvem plechů sloupků a spojek *Obr. 4*. Výkonové transformátory jsou konstruovány pouze z plechů tvaru I seskládaných jako step-lep dle *Obr. 3d a Obr. 3e*. Feromagnetická jádra jsou skládána z plechů buď do čtyřhranných anebo stupňovaných tvarů *Obr. 1*. [4, str. 146, str. 148] Výkonové transformátory jsou však prováděny pouze s odstupňovaným průřezem, což nejvíce připomínajícím kruh. Dle zdroje [5, str. 25] je výhoda tohoto stupňování v tom, že čím více výsledný tvar připomíná kruh, tím jsou závity kratší a tím pádem je i menší odpor

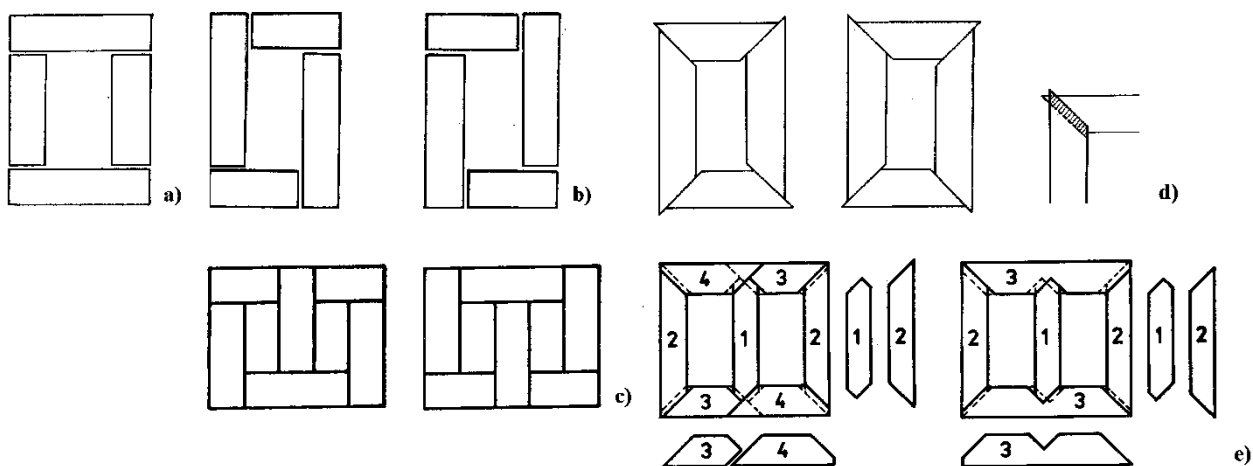
vinutí, což vede k menším Jouleovým ztrátám. Závity cívek je výhodnější dělat kulaté z důvodu vyšší odolnosti vůči zkratovým silám, jednoduššímu navíjení a homogenní tloušťce izolace mezi závity (u čtvercových závitů v rozích je izolace více mech. namáhaná a kvůli úhlu ohnutí i zúžena). Tyto zkratové síly, které působí na závity, se lépe rozloží nežli u obdélníkového tvaru a nedojde k prohnutí vodiče. A jelikož cívky jsou kruhového tvaru, tak se jádra transformátoru konstruuje do co nejvíce kruhového tvaru, aby byl co nejvíce využit prostor v cívce a největší část magnetického toku se uzavírala skrze magnetický obvod (hlavní magnetický tok). Sloupky transformátorů mohou také obsahovat chladicí kanálky, které zlepšují chlazení u velkých transformátorů. Tyto chladicí kanálky mohou být buď podélné anebo příčné. Příčné kanálky vůči podélným mají výhodu v lepším chlazení, ale nevýhoda spočívá v tom, že příčné kanálky způsobí potřebu složitějšího skládání kvůli rozpadu sloupku na samostatné segmenty *Obr. 2.* [3, str. 109] V praxi podélné kanálky na uchlazení výkonových transformátorů stačí a nevyplatí se kvůli zlepšení chlazení řešit způsobené problémy, které by vznikly při příčných kanálcích.



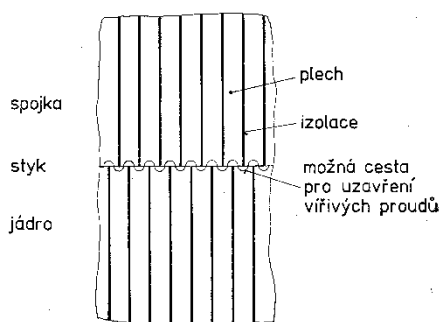
Obr. 1: Varianty stupňovitých průřezů feromagnetického jádra: a) pro transformátory malého výkonu, b) pro transformátory velkého výkonu, c) válcový [4, str. 148]



Obr. 2: Uspořádání chladicích kanálků v jádře: a) podélné, b) příčné chladicí kanálky [3, str. 109]



Obr. 3: Porovnání technik skládání plechů magnetického obvodu, a to s tupým stykem a přeplátováním: a) natupo 1f obvod b) přeplátovaný 1f obvod pod úhlem 90° c) přeplátovaný 3f obvod pod úhlem 90° d) přeplátovaný 1f obvod pod úhlem 45° (step-lap) e) přeplátovaný 3f obvod pod úhlem 45° (step-lap) [1, str. 41-43] [4, str. 146-147]



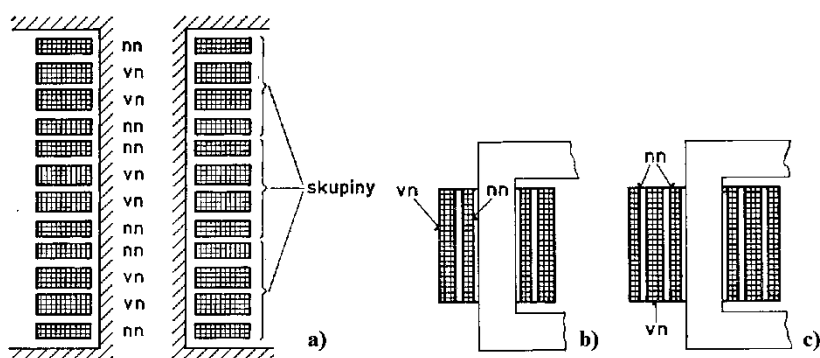
Obr. 4: Kontaktní místo plechů vodorovné spojky a sloupku s tupým stykem s ukázanou možnou cestou, přes kterou se mohou uzavírat vířivé proudy [4, str. 146]

1.1.2 Vinutí

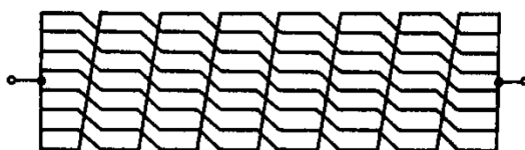
Všechny transformátory disponují primárním a sekundárním vinutím, u některých provedení transformátoru se však vyskytuje i vinutí terciární. Primární vinutí slouží jako spotřebič, který vybudí magnetický tok skrze magnetický obvod a sekundární vinutí má funkci elektrického zdroje. Terciární vinutí se provádí například z důvodu napájení vlastní spotřeby (elektrárny, nebo rozvodné stanice) anebo k symetrizaci sítě.

Mezi důležité vlastnosti, které jsou kladeny na vinutí transformátoru, patří elektrická a mechanická pevnost, technologická proveditelnost, odolnost izolace vinutí proti tepelnému namáhání a ekonomika provozu z pohledu ztrát. Do materiálů, ze kterých se vyrábějí vodiče pro vinutí transformátorů, spadá měď a hliník. Průřezy vodičů, které se využívají jsou kruhové (drát) anebo čtyřhranné (pás). Čtyřhranného průřezu vodiče se využívá u výkonových transformátorů a jejich výhodou je lepší vyplnění prostoru. Mezi způsoby izolace vodiče u transformátoru se řadí například opředení a opletení bavlnou, dvojitě opředení bavlnou, alespoň dvojitě diagonální ovinutí papírovým páskem, silikonové izolace anebo elektroizolační laky. Výhodou laku je vysoká elektrická pevnost při malé nanesené vrstvě, čímž se docílí zmenšení rozměrů vzduchových transformátorů, ale pro olejové transformátory je nejvhodnější variantou papír, který se nasákne olejem. Dle vzájemné polohy vinutí nn a vn na sloupku transformátoru dělíme vinutí na válcové (souosé) a kotoučové (prostrídáné) (*Obr. 5*). Dále můžeme válcové vinutí dělit na souosé jednoduché a souosé dvojitě, kdy v případě souosého jednoduchého vinutí jsou cívky nn obvykle umístěny blíže jádru a cívky vn je objímají. Odůvodnění toho, proč je vinutí nn blíže jádru je to, že není potřeba takové izolace vůči kostře, jako by bylo nutné u vn . Změnou v případě souosého dvojitěho vinutí je to, že se vinutí nn rozdělí na dvě poloviny, a to za účelem omezení magnetického rozptylu tím, že druhá polovina vinutí nn se vloží vně vinutí vn oproti konstrukci souosého jednoduchého vinutí. Tato možnost se však z ekonomických důvodů u výkonových transformátorů téměř nevyužívá. Pro případ kotoučového vinutí se střídají deskové cívky nn a vn , cívky na prvním a posledním místě jsou poloviční a nn , což je z důvodu zlepšení izolace a magnetické souměrnosti. [3, str. 115] [4, str. 170-171] [8, str. 255-256] Dle konstrukce válcového (souosého) vinutí jej můžeme dále ještě dělit do pěti skupin, a to na jednovrstvé a dvouvrstvé vinutí, jednovrstvé vinutí s více paralelními vodiči vinutými v jednoduché nebo vícechodé šroubovici, mnohovrstvé vinutí, cívkové mnohovrstvé vinutí a plynulé cívkové vinutí. Vyjde-li potřebný vodič dle protékajícího proudu příliš tlustý, je nutné ho rozdělít na tzv. paralelní větve (vodiče), čímž se sníží přídatné ztráty způsobené skin efektem. Aby byl proud v paralelních vodičích rozdělen

rovnoměrně, musí být činné odpory a reaktance jednotlivých paralelních větví stejně velké. Za tímto účelem se provádí tzv. transpozice (vystřídání) vodičů, při které dílčí vodiče vystřídají všechny polohy ve společném vodiči, který se skládá z paralelních větví dílčích vodičů a tato úplná transpozice je vidět na *Obr. 6*. Transponovaný vodič se jinak také nazývá Roeblova tyč. [4, str. 172-175] [3, str. 116]



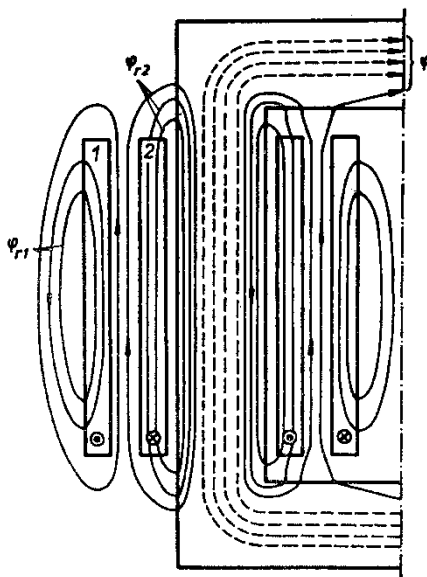
Obr. 5: Dělení vinutí dle jejich vzájemné polohy: a) kotoučové (prostřídané) b) válcové (souosé) jednoduché c) válcové (souosé) dvojité [4, str. 171]



Obr. 6: Úplná transpozice vodičů [1, str. 170]

1.2 Magnetický tok

Je-li cívka protékána elektrickým proudem, dojde k vybuzení magnetického toku, který se dá dle jeho způsobu uzavírání rozdělit na hlavní a rozptylový (*Obr. 7*). Jedná-li se o transformátor se dvěma vinutími, můžeme rozptylové toky rozdělit ještě na rozptylové toky primárního a sekundárního vinutí.



Obr. 7: Rozložení magnetického toku jádrového transformátoru: φ je hlavní magnetický tok, φ_{r1} je rozptylový magnetický tok vybuzený vinutím vn a φ_{r2} je rozptylový magnetický tok vybuzený vinutím nn [1, str. 75]

1.2.1 Hlavní magnetický tok

Hlavní magnetický tok je ten, který je tvořen primárním i sekundárním vinutím, uzavírá se skrze magnetický obvod, na kterém je nasunuto primární i sekundární vinutí a způsobuje kvůli jeho v čase proměnnému charakteru naindukování napětí do sekundárního vinutí. Hlavní tok slouží k přenosu energie z primárního do sekundárního vinutí [1, str. 74]. Proud, který protéká sekundárním vinutím, je opačně orientovaný nežli proud v primárním vinutí, a to způsobuje vznik odpudivých sil mezi nimi.

1.2.2 Rozptylový magnetický tok

Zdroj [2, str. 153-154] popisuje rozptylový magnetický tok, jako tok vybuzený jediným vinutím, který neinteraguje s druhým vinutím, některé z nich procházejí pouze mimo magnetický obvod, zatímco některé se z části uzavírají skrze něj. Mimo magnetický obvod je míněno například vinutí, olej, vzduch, nádoba a jiné konstrukční části. Z důvodu opačné orientace proudu v primárním a sekundárním vinutí jsou vybuzené rozptylové magnetické toky taky opačně orientované, díky tomu mezi vinutími v tzv. kanálu se tyto dva toky sčítají a vzniká zde nejsilnější rozptylové magnetické pole. Rozptylové magnetické toky mohou dosahovat jednotek až několik desítek procent hlavního toku. Ovlivňují změnu napětí při zatížení, paralelní chod transformátoru, chování transformátoru při zkratu a způsobují přidavné ztráty ve vinutí a kovových částech. [2, str. 154] [1, str. 74, 183]

1.3 Stínění

Stínění u transformátorů slouží k omezení rozptylového magnetického toku z důvodu omezení ztrát způsobených tímto tokem, a také z důvodu omezení výskytu magnetického pole v okolí výkonových transformátorů kvůli hygienickým limitům. Pro stínění rozptylového magnetického toku se používá u transformátoru tří různých způsobů, a to stínítek připevněných z vnitřní strany nádoby (magnetic shunts), stínítka upevněná nad i pod vinutím (yoke shunts), anebo stínění ve formě vnitřního obložení nádoby hliníkem či mědí. Tyto způsoby stínění můžeme rozdělit na magnetické a elektrické, kdy stínítka na nádobě a nad vinutím spadají do kategorie magnetického stínění a vnitřní obložení hliníkem nebo mědí se nazývá stíněním elektrickým. Stínění se používá u velkých transformátorů, u malých to není běžné. [9, str. 207]

Účinnost stínění závisí na absorpci, odrazu (reflexi) a mnohonásobném odrazu uvnitř stínění a tuto účinnost lze dopočítat s využitím rovnice (1.4). Útlum způsobený absorpcí, jak je vidět ve vzorci (1.5), je závislý na tloušťce stínítka a frekvenci a s růstem těchto parametrů narůstá i útlum absorpcí. Další složkou, která zlepšuje účinnost stínění, je útlum způsobený reflexí při dopadu rozptylového toku na stínítka. Ze vzorce (1.6) vyplývá, že tento útlum není závislý na tloušťce stínítka, ale je závislý na frekvenci, při jejímž nárůstu tento útlum klesá. Mnohonásobné odrazy, které popisuje rovnice (1.7) jsou ovlivněny poměrem tloušťky stínítka a hloubky vniku. Pokud by tloušťka stínítka byla mnohonásobně větší než hloubka vniku, tak by se účinek mnohonásobných odrazů uvnitř stínítka blížil k nule. Pokud bude hloubka vniku mnohonásobně větší než tloušťka stínítka, tak se mnohonásobné odrazy projeví a dojde kvůli nim ke zhoršení účinnosti stínění, jelikož útlum mnohonásobným odrazem vyjde záporný. Z toho vyplývá, že mnohonásobné odrazy uvnitř stínítka nejsou žádané. [10]

$$SE = Ab + Re + Mn \quad (1.4)$$

$$Ab = 8,69 \cdot \frac{t_s}{\delta_s} = 0,0069 \cdot t_s \cdot \sqrt{\omega \cdot \mu_r \cdot \sigma} \quad (1.5)$$

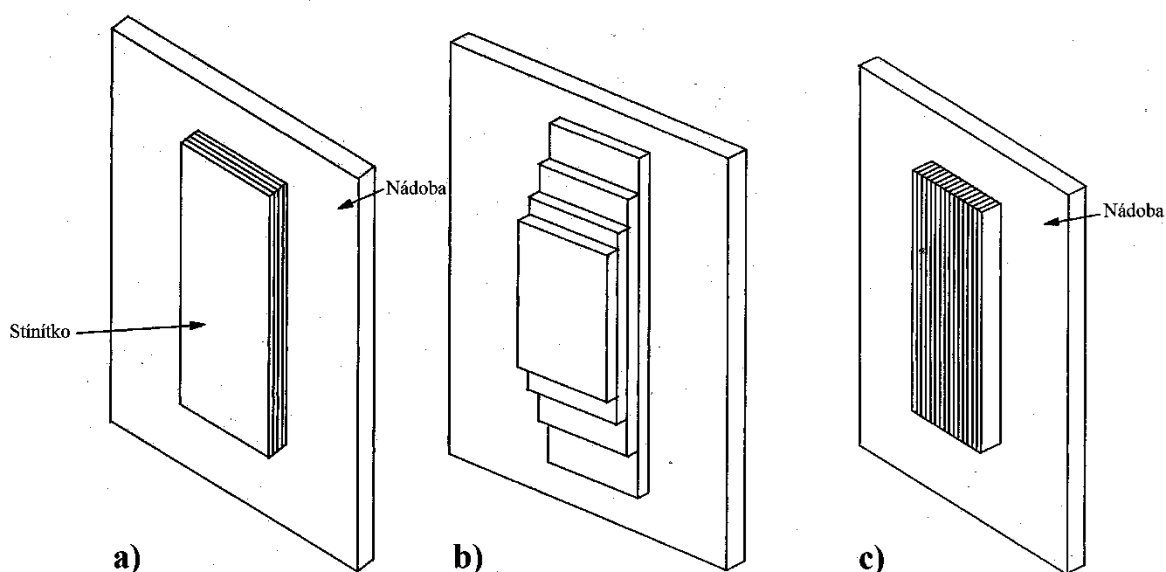
$$Re \approx 20 \cdot \log \left(\frac{1}{4} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\omega \cdot \mu_r \cdot \varepsilon_0}} \right) \quad (1.6)$$

$$Mn = 20 \cdot \log \left| 1 - \left(\frac{Z_0 - Z_M}{Z_0 + Z_M} \right)^2 \cdot e^{-\frac{2 \cdot t_s}{\delta_s}} \cdot e^{-j \frac{2 \cdot t_s}{\delta_s}} \right| \quad (1.7)$$

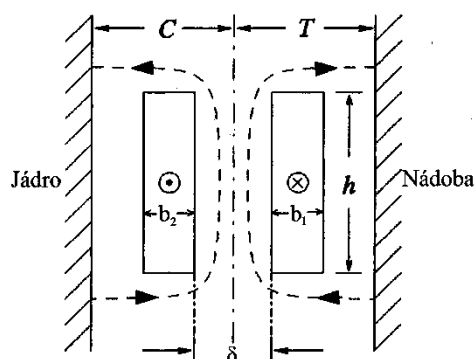
1.3.1 Magnetické stínění

Magnetická stínítka (magnetic shunts) jsou většinou seskládána ze stejného plechu, ze kterého je složen i magnetický obvod transformátoru a občas se využívá i stejná role pro stříhání plechů jak pro jádro, tak pro stínítka. Rozptylové magnetické pole s těmito magneticky vodivými plechy interaguje tím způsobem, že tento tok se uzavírá skrze ně. Jelikož jsou orientované, tak tento magnetický tok prochází ve směru válcování (směr nejnižšího magnetického odporu) a neprochází skrze stínění do nádoby. Magnetický odpor mezi stíněním a nádobou ještě zvyšuje tenká vrstva oleje, která se zde nachází. Nevýhoda tohoto způsobu stínění tkví v tom, že případné přesycení plechů vede k neúčinnému stínění. Výška použitých plechů na stínítka se řeší dvěma způsoby, v obou případech má být ale vyšší než výška použitých cívek v transformátoru. Prvním, a i tím jednodušším způsobem je, že plechy budou mít výšku rovnu vzdálenosti mezi středy horních a dolních vodorovných spojek, čímž se zajistí i přesah stínítek přes vinutí. Druhý způsob, který se používá pro určení výšky plechů stínítek, je založen na FEM analýze rozptylových toků. Stínítka se také připevňují z vnitřní strany transformátorové nádoby více způsoby, a to buď na plocho (width-wise shunt), anebo na hranu (edge-wise shunt). Varianta připevnění stínítek na plocho z důvodu ušetření materiálu se ještě optimalizuje odstupňováním plechů, kdy nejvíce plechů je uprostřed a tato varianta se nazývá optimum width-wise shunt (*Obr. 8*). Toto odstupňování je možné, jelikož na konce stínítek dopadá pouze radiální rozptylový magnetický tok, zatímco uprostřed výšky plechů dopadá axiální, který se sčítá s radiálním, čímž vzniká nejvyšší hustota rozptylového magnetického toku uprostřed výšky plechů. Plechy by se měly stříhat co nejužší a stínítka by měla být co nejbliže k sobě, aby stínění bylo co nejučinnější. Tyto plechy se většinou dle zdroje [9, str. 208] stříhají v šířce od 50 mm do 300 mm, jelikož čím je plech užší, tím se jich potřebuje více, což zpomaluje výrobu. Z tohoto důvodu je potřeba kompromisu mezi snížením vstupních ztrát způsobených užšími plechy a dobou výroby těchto plechů. Minimální tloušťku magnetických stínítek složených z plechů připevněných na plocho (width-wise shunt) lze dopočítat u sousých vinutí dle vzorce (1.8) při znalosti nutných rozměrů z *Obr. 9*. Velikost indukce, která se dosadí do vzorce, aby se plechy nepřesytily, se určuje dle vlastností použitých plechů. Pro orientované plechy (CRGO) se udává velikost indukce rovna 1,4 T a pro neorientované plechy (CRNGO) 1,15 T. [9, str. 208-209, 212]

$$ST_{min} = \frac{C}{C + T} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot N \cdot I \cdot \left[\frac{b_1 + b_2}{2} + \delta \right]}{h \cdot B} \quad (1.8)$$



Obr. 8: Způsoby uložení magnetických stínítek: a) na plocho (width-wise shunt) b) optimalizované na plocho (optimum width-wise shunt) c) na hranu (edge-wise shunt) [9, str. 209-210]



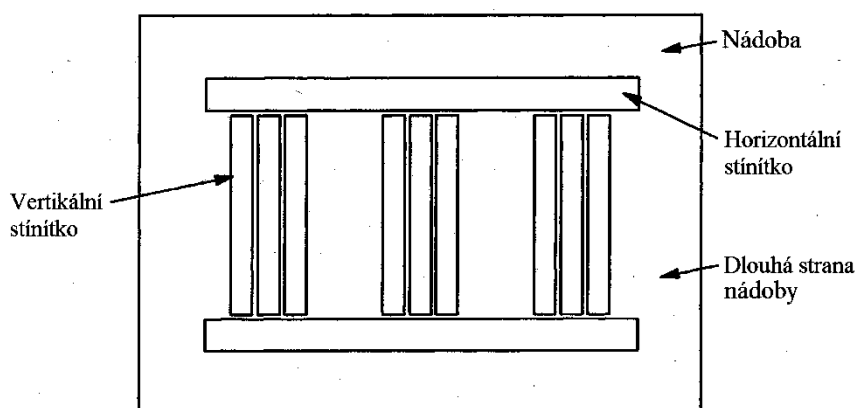
Obr. 9: Rozptylový magnetický tok od jednotlivých vinutí sousědho vinutí a jejich interakce s nádobou a jádrem [9, str. 195]

Pokud připevníme stínítka hranou k nádobě (edge-wise shunt), tak tím docílíme rapidního snížení indukovaných vířivých proudů, jelikož rozptylový magnetický tok prochází do stínítka úzkými hranami jednotlivých plechů, ze kterých je stínítka složeno. Výhoda tohoto typu stínění oproti upevnění na plocho (width-wise shunt) tkví v nižších vířivých proudech, jak již bylo zmíněno, a ve vyšší magnetické vodivosti ve směru procházejícího rozptylového magnetického toku. Tato vyšší magnetická vodivost je způsobena tím, že průchodu toku nebrání nemagnetické mezery způsobené izolací mezi plechy jako je tomu u width-wise shunt. Proto se magnetický tok drží v daném plechu, do kterého vstoupil, pokud nedojde k přesycení. V tom případě dochází k přechodu magnetického toku mezi plechy i přes

izolaci. Nevýhody tohoto způsobu uložení stínění, které uvádí zdroj [9, str. 210] jsou vyšší cena a časově náročnější výroba, ale z praxe se ukazuje, že většina evropských výrobců ho přesto využívá. [9, str. 209-210]

Stínítka upevněná nad a pod vinutím (yoke shunts) slouží k pohlcování rozptylového magnetického toku, který vychází z konců vinutí, a k jeho přenosu do magnetického obvodu. Toto stínění je umístěno souběžně s vodorovnými spojkami a je s nimi buď přímo spojeno, anebo se mezi nimi nachází malá mezera, která ale snižuje účinnost přenosu tohoto toku do jádra. [9, str. 211-212]

V praxi se lze také setkat s kombinací elektrického a magnetického stínění, kdy jsou na nádobě připevněna vertikální a horizontální (v úrovni vodorovných spojek) magnetická stínítka, což je vidět na *Obr. 10*. Elektrické stínění se nachází na kratších stranách nádoby a slouží k odražení dopadajícího rozptylového toku směrem k magnetickým stínítkům. [9, str. 212]



Obr. 10: Kombinace vertikálních a horizontálních magnetických stínítek připevněných na vnitřní dlouhé straně nádoby transformátoru [9, str. 213]

1.3.2 Elektrické stínění

Jak už vyplývá i z názvu, tak pro tento způsob stínění se využívá elektricky vodivých materiálů, jako jsou například hliník nebo měď. Tímto materiálem se poté obloží vnitřní strana nádoby. V minulosti se vyskytovaly i transformátory, které měly obloženou celou vnitřní stranu nádoby, což lze vidět i ve zdroji [1, str. 653]. Tento způsob stínění využívá naindukovaných vířivých proudů do stínítka, které následně díky nim odráží dopadající radiální rozptylový magnetický tok. Elektrické stínění je oproti magnetickému méně výhodné, a to z důvodu principu, na kterém funguje. Jelikož rozptylový tok, který na tento

typ stínění dopadá, je odražen a následně se uzavírá skrze jinou konstrukční část. Z toho vyplývá, že ztráty v konstrukčních částech a stínění jsou větší, pokud je použito elektrické stínění nežli magnetické stínění. Ztráty, které vznikají v samotném elektrickém stínítku, se projevují ve formě tepla, které je potřeba odvádět, aby nedocházelo k jeho přehřívání. Výhodou elektrického stínění je však menší hmotnost. Hlavním kladem tohoto způsobu stínění je možnost stínění rozptylového magnetického pole vybuzeného velkými proudy, což magnetické stínění neumožňuje tak kvalitně, kvůli mezerám mezi stínítky připevněnými na vnitřní straně nádoby a možnému přesycení plechů. [9, str. 207-208, 213-214]

V praxi jsou elektrická stínění využívána většinou jako doplňkové stínění k magnetickému stínění, kdy slouží k omezení lokálních hot-spotů.

1.4 Ztráty

Ztráty v transformátoru jsme schopni rozdělit do dvou skupin dle způsobu jejich změření, a to na ztráty nakrátko a naprázdno. Dále jsme schopni ztráty rozdělit dle místa jejich vzniku na ztráty v elektricky vodivém materiálu (ztráty ve vodiči) a magneticky vodivém materiálu (ztráty v železe) [2, str. 223]. Mezi ztráty nakrátko se řadí ztráty ve vinutí (Jouleovy ztráty) a přídavné ztráty v kovových konstrukčních částech [1, str. 161]. A ztrátami naprázdno jsou myšleny ztráty v železe. Z důvodu toho, že transformátor spadá mezi netočivé elektrické stroje, se zde nevyskytují ztráty mechanické [6, str. 13].

Ztráty v železe musí být menší než ve vinutí, protože jsou neustále hrazeny ze sítě [2, str. 225]. Transformátory se vyráběly v roce 1968 dle zdroje [2, str. 225] většinou s poměrem ztrát v intervalu $\frac{\Delta P_{Fe}}{\Delta P_j} \in \left(\frac{1}{3}; \frac{1}{4}\right)$. Z důvodu velkých celkových ztrát na transformátorech bylo 21. května 2014 zveřejněno nařízení komise (EU) č. 548/2014, které zpřísňuje požadavky na účinnost a tím i na ztráty výkonových transformátorů nad 1 kVA kromě transformátorů speciální konstrukce (k přímému připojení k peci, k použití na moři, ...). Například zdroj [13, str. 18] uvádí, že střední (transformátory s nejvyšším napětím v intervalu od 1,1 kV do 36 kV a jmenovitým zdánlivým výkonem v intervalu od 5 kVA do 40 MVA) a velké (transformátory s nejvyšším napětím větším než 36 kV a jmenovitým zdánlivým výkonem větším než 5 kVA anebo transformátory s jmenovitým zdánlivým výkonem větším než 40 MVA) transformátory zapojené do elektrické sítě v zemích EU27, dosáhly celkových ztrát rovných 93,4 TWh/rok v roce 2008. Z toho důvodu byl dle nařízení komise (EU) č. 548/2014 zdrojem [12] minimální index špičkové účinnosti pro velké výkonové transformátory o zdánlivém jmenovitém výkonu 40 MVA nastaven od 1. července

2015 na 99,684 % a od 1. července 2021 zvýšen na 99,724 %, což je i zmíněno v *Tabulka 1*. [12], [13, str. 18]

Tabulka 1: Vybrané hodnoty minimálního požadovaného indexu špičkové účinnosti pro velké výkonové transformátory ponořené do kapaliny získané ze zdroje [12]

S _n (MVA)	Stupeň 1 (1.července 2015)	Stupeň 2 (1. července 2021)
	PEI _{min} (%)	
40	99,684	99,724

1.4.1 Ztráty ve vinutí

Jouleovy ztráty se navenek projevují jako teplo, které je v tepelných aplikacích vítané, ale u transformátoru tomu tak není. Z toho důvodu se snažíme vznik tohoto tepla omezovat a dimenzovat na něj izolaci vinutí, která je na něj velmi náchylná. Vznik těchto Jouleových ztrát si lze představit jako přeměnu kinetické energie nabitých částic (elektronů), které při průchodu elektrickým vodičem narážejí do krystalové mřížky, na energii tepelnou. Nevýhodou tohoto nárůstu teploty je také to, že čím je teplota vyšší, tím krystalová mřížka vodiče více kmitá a nabití částice hůře procházejí, čímž narůstá odpor i ztráty. [6, str. 13-14] Jouleovy ztráty lze dělit na ztráty základní ve vinutí a přídavné ztráty ve vinutí. Obě složky těchto ztrát jsou závislé na velikosti teploty, ale opačně. Jak již bylo zmíněno, tak ztráty základní s teplotou lineárně narůstají, ale ztráty přídavné ve vinutí naopak s teplotou klesají. Což je i vidět ve vzorci (1.11), jelikož se vzrůstající teplotou roste u vodiče i měrný odpor. Vzorec (1.10) popisuje výpočet Jouleových ztrát, pokud by vinutími protékal pouze stejnosměrný proud (tzn. rovnoměrně rozložená hustota elektrického proudu skrze celý průřez vodiče), což jsou tzv. Jouleovy základní ztráty. Tyto základní ztráty transformátoru budou vždy nabývat menších hodnot nežli ztráty Jouleovy, které jsou ve vzorci (1.9). Jelikož z důvodu protékajícího střídavého proudu se zde vyskytují i přídavné ztráty, které jsou způsobeny skinefektem a neúplným vystřídáním paralelních větví vinutí. V rovnici (1.9) je vidět, že celkové Jouleovy ztráty lze vypočítat i s využitím změřených stejnosměrných odporů obou vinutí, ale je nutné výpočty pro jednotlivá vinutí přenásobit součinitelem přídavných ztrát, který nabývá velikosti větší než 1. Velikost tohoto součinitele přídavných ztrát se určuje v závislosti na vodivosti, teplotě, provedení, materiálu vinutí a kmitočtu protékajícího proudu. [1, str. 161-162] [2, str. 224]

$$\begin{aligned} \Delta P_{jAC} &= m \cdot R_{1AC} \cdot I_1^2 + m \cdot R_{2AC} \cdot I_2^2 \\ &= k_1 \cdot m \cdot R_{1DC} \cdot I_1^2 + k_2 \cdot m \cdot R_{2DC} \cdot I_2^2 \end{aligned} \quad (1.9)$$

$$\Delta P_{jDC} = m \cdot R_{1DC} \cdot I_1^2 + m \cdot R_{2DC} \cdot I_2^2 \quad (1.10)$$

$$\Delta P_{jd} \sim \frac{I_1^2}{\rho} \quad (1.11)$$

Skinefekt se také jinak nazývá elektrický povrchový jev a je způsoben vířivými proudy ve vodiči, které vytlačují protékající proud k povrchu vodiče, což zapříčiní nerovnoměrně rozloženou hustotu elektrického proudu skrze celý průřez vodiče. Tyto vířivé proudy jsou do vodiče indukovány rozptylovým tokem střídavého magnetického pole. Tento jev způsobí, že průřez vodiče není plně využit a vodič se navenek projevuje vyšším odporem, než který udává daný materiál, teplota a rozměry vodiče. Tento odpor se nazývá efektivní hodnota odporu. Dalším negativním projevem tohoto jevu je snížení vnitřní indukčnosti vodiče na tzv. efektivní vnitřní indukčnost. Z rovnice (1.12), která popisuje hloubku vniku od hrany vodiče, lze dobře vidět, že velikost efektivního odporu narůstá s velikostí frekvence protékajícího proudu, jelikož se zmenšuje hloubka vniku a tím i využitý průřez vodiče. Tento jev se omezuje složením vodiče z dílčích, navzájem odizolovaných vodičů menšího průřezu, neboť tím zvýšíme odpor dílčích vodičů, což následně sníží i velikost vířivých proudů. V ideálním případě by hloubka vniku nabývala stejné hodnoty jako poloměr dílčího vodiče. [1, str. 161] [7, str. 404, 407, 408, 409]

$$\delta_s = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu}} \quad (1.12)$$

Přídavné ztráty ve vinutí způsobené nedokonalým vystřídáním paralelních větví jsou způsobeny cirkulačními (vyrovnávacími) proudy. Hlavní a rozptylový magnetický tok indukuje do paralelních větví elektromotorickou sílu. Tato elektromotorická síla indukovaná od hlavního magnetického toku je ve všech paralelních větvích stejná. Z čehož po dosazení do rovnice (1.13) vyplývá, že se tento tok na vzniku cirkulačního proudu nepodílí, jelikož aritmetický průměr elektromotorických sil (E_{str}) se rovná elektromotorické síle v p -té větvi (E_p). A to znamená, že na vzniku cirkulačního proudu se podílí pouze rozptylový tok, jak je uvedeno ve vzorci (1.14), jelikož ten neindukuje do paralelních větví stejné elektromotorické síly. Tyto ztráty ve vodiči lze omezit pouze tím, že u vinutí bude provedeno úplné vystřídání. [1, 174-176, 181]

$$I_{cp} = \frac{E_{str} - E_p}{R_p} \quad (1.13)$$

$$I_{cp} = \frac{E_{rstr} - E_{rp}}{R_p} \quad (1.14)$$

1.4.2 Ztráty v železe

Ztráty v železe se dále dělí na ztráty hysterezní (magnetizační) a ztráty vířivými proudy. Ztráty hysterezní jsou způsobovány neustálým přemagnetováním materiálu a jsou úměrné ploše hysterezní smyčky materiálu. Z toho vyplývá, že je pro magnetický obvod (plechy) transformátoru nejvhodnější magneticky měkký materiál, jelikož takovýto materiál disponuje úzkou hysterezní křivkou a je potřeba dodání malého množství energie pro přemagnetování materiálu. Jak je vidět v rovnici (1.16), tak ztráty hysterezní jsou závislé na velikosti frekvence protékajícího proudu vinutím [5, str. 28]. Faktory, které ovlivňují velikost hysterezních ztrát, jsou chemické složení použitého materiálu, tepelné zpracování, mechanické zpracování a nečistoty (uhlík, dusík, kyslík a síra), které se vyskytují v materiálu a navyšují hysterezní ztráty [1, str. 56]. Dle zdroje [1, str. 56] je vhodné pro omezení množství uhlíku přidávat křemík, který omezuje schopnost rozpouštění uhlíku v materiálu a tím způsobuje snížení hysterezních ztrát.

Ztráty v železe způsobené naindukovanými vířivými proudy ve feromagnetickém jádře transformátoru omezujeme stejným postupem jako ztráty od vířivých proudů ve vinutí (vodič je složen z několika dílčích vodičů malého průřezu a díky zmenšení průřezu se zvětší odpor jednotlivých dílčích vodičů), a to navýšením odporu, nyní však zvyšujeme odpor jádra. Činíme tak dvěma postupy, zaprvé do feromagnetického materiálu přidáváme křemík, který zhoršuje elektrickou vodivost. Nevýhoda tohoto kroku tkví v tom, že s navyšujícím poměrem křemíku roste i křehkost materiálu. A druhým způsobem navýšení elektrického odporu magnetického obvodu, který se využívá, je, že místo jednoho masivního kusu seskládáme obvod z navzájem odizolovaných plechů. Z rovnic (1.15) vyplývá, že pokud namísto masivního jádra použijeme jádro seskládané ze tří navzájem izolovaných plechů s celkovou tloušťkou jako mělo masivní jádro, tak pouze tímto krokem docílíme devítinásobného navýšení odporu magnetického obvodu.

$$R_{pl1} = \rho \cdot \frac{l_1}{S_1}$$

$$R_{pl2} = \rho \cdot \frac{l_2}{S_2} = \rho \cdot \frac{3 \cdot l_1}{\frac{S_1}{3}} = \rho \cdot \frac{9 \cdot l_1}{S_1} \quad (1.15)$$

Z rovnice (1.16) je patrné, že ztráty v železe způsobené vířivými proudy, jsou závislé na kvadrátu frekvence protékajícího proudu vinutím [5, str. 28]. Tento jev způsobený vířivými proudy v jádře se také jinak nazývá magnetický povrchový jev, anebo magnetický skin efekt, kdy naindukované vířivé proudy způsobují vytlačení magnetického toku k povrchu a kvůli tomu není využit celý průřez [7, str. 412].

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Fe h} + \Delta P_{Fe v} \approx B^2 \cdot f + B^2 \cdot f^2 \quad (1.16)$$

1.4.3 Přídavné ztráty v kovových konstrukčních částech

Tyto ztráty jsou zapříčiněny rozptylovým magnetickým polem, které indukuje vířivé proudy do masivních kovových konstrukčních částí transformátoru. Mezi tyto konstrukční části patří například stěny, dno, víko nádoby, stahovací konstrukce vinutí a jader. Tyto ztráty jsou omezovány dvěma způsoby, a to elektrickým anebo magnetickým stíněním. Kdy elektrické stínění změní rozložení rozptylového magnetického pole, avšak magnetické stínění tvar rozptylového magnetického pole téměř nezmění. Pro elektrické stínění se využívají hliníkové, anebo měděné plechy a pro magnetické stínění se využívá svazků transformátorových plechů. Pro oba způsoby stínění lze tyto plechy připevňovat z vnitřní strany transformátorové nádoby. Plechy pro magnetické stínění se upevňují převážně na dlouhé strany nádoby, kdežto elektrické stínění je převážně využito pro stínění součástí kostry, konstrukčních a vymežovacích částí nádoby. [1, str. 183] [5, str. 28]

1.5 Použití

Transformátory se využívají pro různé aplikace, jako jsou například snížení, anebo zvýšení velikosti napětí v přenosové a distribuční síti, pro galvanické oddělení, jako měřicí transformátor proudu anebo napětí, pro změnu počtu fází, pro změnu kmitočtu, pro řízení toku výkonů (například na hranicích států), symetrizace sítě a jako zdroj pro spotřebič. [4, str. 107]

2 Provedení transformátoru

V praktické části mé diplomové práce se budu zabývat venkovním výkonovým transformátorem, který byl navržen, vyroben a odzkoušen společností ETD Transformátory a.s. dle požadovaných parametrů od zadavatele.

2.1 Transformátor

Jedná se o 3f výkonový transformátor konstruovaný pro síť 50 Hz. Transformátor je navržen na zdánlivý výkon 40 MVA, strana vyššího napětí je konstruována na jmenovité napětí rovné 110 kV a strana napětí nižšího na 23 kV jmenovitých, jak je i uvedeno v *Tabulka 2*. Již velikost napětí, na které je zařízení konstruováno napovídá tomu, že se jedná o výkonový transformátor provozovaný v distribuční síti. Dle informací, které uvádí *Tabulka 2* je napětí nakrátko rovno 11,5 % s tolerancí $\pm 7,5$ %, proud naprázdno je 0,2 % s tolerancí 30 %, ztráty nakrátko jsou 105 kW a ztráty naprázdno jsou 21 kW. Index špičkové účinnosti transformátoru $\geq 99,684$ % uvedený v *Tabulka 2* odpovídá svojí velikostí nařízení komise (EU) č. 548/2014 stupně 1 uvedené v *Tabulka 1*, které nabylo platnosti 1. července 2015. Vzhledem k tomu, že transformátor byl objednáno v roce 2018 a práce na jeho vývoji začaly chvíli poté, tak stále ještě platily nižší požadavky na minimální PEI a tím pádem není potřeba splňovat stupeň 2, i když transformátor byl dodán na stanoviště až po červenci 2021.

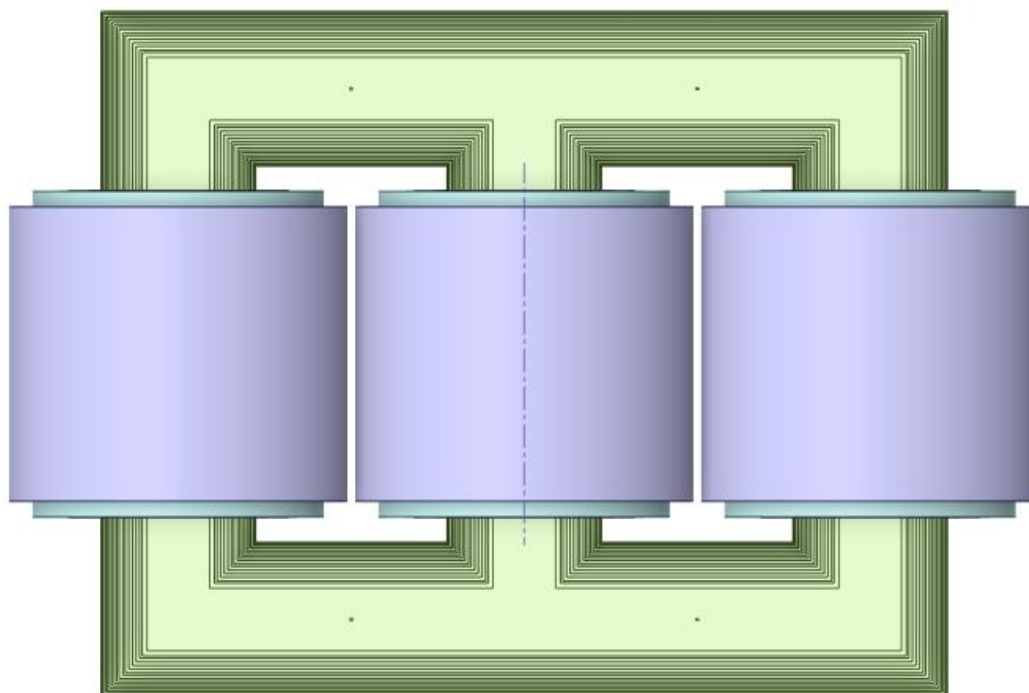
Tabulka 2: Základní údaje transformátoru

Typ	ER33M-0	
Druh transformátoru	Výkonový v distribuční síti	
Provedení	venkovní	
Počet fází	3	
frekvence (Hz)	50	
Skupina spojení	YNyn0(d)	
Chlazení	ONAN/ONAF : (do 24/40 MVA)	
PEI index (%)	$\geq 99,684$	
Hladina akustického výkonu	$\leq 69/70$ dB(A)	
Třída izolace	A	
Druh zatížení	Trvalý chod při jmenovitých hodnotách	
Hmotnost (kg)	Olej	14 644 cca
Dovolené oteplení (K)	Olej horní vrstva	60
	Vinutí střední	65
Max. teplota okolí (°C)	40	
Min. teplota okolí (°C)	-25	
Max. nadmořská výška (m. n. m.)	1 000	

	vn	nn	TN
Zdánlivý výkon (MVA)	40	40	12,5
Napětí (kV)	110	23	6,3
Proud (A)	210	1 004	1 146
Počet stupňů (±)	8		
Krok (%)	2		
U_{pm} (kV)	123	24	7,2
LI (kV)	550	125	
			Tolerance
u_k (%)	11,5	±7,5 % (pro 40MVA)	
i₀ (%)	0,2	30 %	
ΔP₀ (kW)	21	STN EN 60 076	
ΔP_k (kW)	105		
ΔP_{celk} (kW)	126		

2.1.1 Magnetický obvod

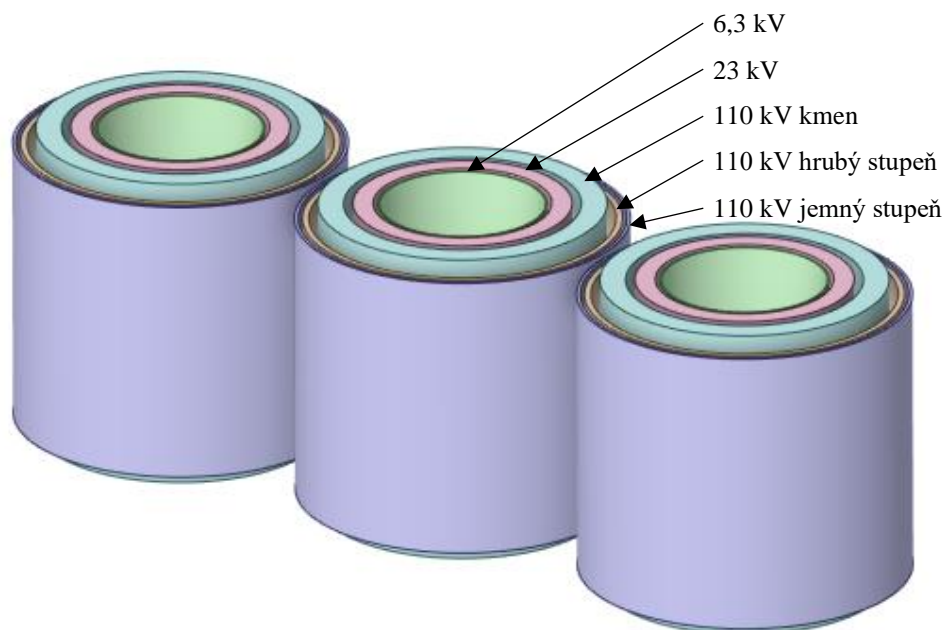
Jak lze dobře vidět na *Obr. 11* jedná se o jádrový transformátor se stupňovitým průřezem. Je složen ze zastudena válcovaných orientovaných plechů tvaru I skládaných způsobem zvaným step-lep 5x1. Plechy Power core H 080-23L, které byly využity pro tento transformátor, mají tloušťku 0,23 mm a udávané ztráty v železe při indukci 1,443 T jsou 17,64 kW. Spočtená hmotnost všech plechů, ze kterých je seskládán magnetický obvod činí 29 394 kg, což je uvedeno i v *Tabulka 3*. Počet vrstev plechů činí přibližně 2 682 plechů, z čehož vyplývá, že bylo na seskládání magnetického obvodu transformátoru využito přibližně 13 410 plechů I. V jádrech (sloupcích) magnetického obvodu transformátoru se nachází jeden podélný chladicí kanálek pro zlepšení chladícího účinku.



Obr. 11: Magnetický obvod transformátoru s vinutím

2.1.2 Vinutí

Vinutí jednotlivých cívek je realizováno s využitím měděných vodičů obdélníkového průřezu. Reálné cívky byly zjednodušeny pro simulaci v programu ANSYS Electronics do podoby, kterou lze vidět na *Obr. 11* a *Obr. 12*. Jedná se o transformátor s možností regulace velikosti napětí. Pro regulaci je využíváno přepínání odboček na straně vyššího napětí pod zatížením. Tento typ transformátoru umožňuje 16 (± 8 stupňů) stupňů regulace s krokem 2 %. Ovládání je umožněno dálkově tlačítky, nebo tlačítky u motorového pohonu odboček, anebo ručně s využitím kliky u motorového pohonu odboček. Tyto způsoby regulace se ale využívají pro zkoušky a servis, při provozu je regulace automatická a reaguje na napětí v síti. Dle počtu vinutí se jedná o trojvinuťový transformátor, který je zapojen do YNyn0(d), jak je uvedeno i v *Tabulka 2*. Ve stejné tabulce lze i dle velikosti výkonů jednotlivých vinutí a zapojení terciárního vinutí, které je do trojúhelníka, zjistit, že se jedná o transformátor s terciárním vinutím pro kompenzaci nesymetrie sítě. U tohoto druhu transformátoru není terciární vinutí vyvedeno do svorkovnice a je většinou dimenzováno na třetinu výkonu vinutí, která jsou zatěžována.



Obr. 12: Vinutí transformátoru zjednodušené do podoby dutých válců

2.1.3 Nádoba

Transformátorová nádoba o objemu 23 610 dm³ slouží k uložení výše zmíněného magnetického obvodu a cívek nasunutých na jeho tři jádra. Nádoba je svařena z plátů konstrukční oceli o tloušťce v rozmezí od 6 do 15 mm a její celková čistá hmotnost činí 6 611 kg, jak je i uvedeno v *Tabulka 3*. Dopočtená hmotnost transformátorového oleje, která bude potřeba pro naplnění transformátoru je přibližně 14 644 kg, tato informace je uvedena v *Tabulka 2*. Jak lze vidět v *Příloha 1*, *Příloha 2* a *Příloha 3*, tak se tato transformátorová nádoba svým tvarem řadí mezi nádoby nepravidelného tvaru, což lze vidět jak z půdorysu, tak i z bokorysu. Tato nepravidelnost je využívána za účelem snížení požadovaného objemu oleje.

Tabulka 3: Celkové hmotnosti a objemy nádoby, mag. obvodu, kostry a vinutí výkonového transformátoru ER33M-0

	Hodnoty	Jednotky
Nádoba	6 611	kg
	23 610	dm ³
Mag. obvod	29 394	kg
	3 945	dm ³
Kostra	2 722	kg
	606	dm ³
Vinutí	19 253	kg
	2 149	dm ³

2.1.4 Chlazení

Zařízení je konstruováno na okolní teploty v intervalu mezi $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ s maximální nadmořskou výškou rovnou 1 000 m n. m. Což je omezení, které je způsobené poklesem hustoty vzduchu s narůstající nadmořskou výškou, kvůli kterému se snižuje účinnost odvodu tepla ze zařízení do okolí za pomoci proudění a hrozilo by dosažení nebezpečných teplot v transformátoru, které by mohly vést například k poškození izolace vodičů. Chladicí variantou, která se zde využívá do zdánlivého výkonu 24 MVA, je ONAN, pro větší zatížení se poté využívá ONAF, z čehož vyplývá, že se jedná o variantu, jak jsem již výše zmínil, s nuceným chlazením nádoby nebo chladiče. Zde jsou aktivní části přirozeně chlazený za pomoci oleje, který se následně dostane do dvanácti radiátorů DIN, které jsou ochlazovány za pomoci dvou ventilátorů. Tyto ventilátory reagují na velikost změřené teploty oleje v horní vrstvě, kdy maximální dovolené oteplení je 60 K.

2.1.5 Stínítka

Jak lze vidět v *Příloha 9*, tak v tomto případě byla využita varianta návrhu výšky stínítka, která byla zmíněna v kapitole *1.3.1 Magnetické stínění*, kdy plechy stínítka mají délku rovnou vzdálenosti mezi středy horních a dolních vodorovných spojek. Magnetické stínění z *Příloha 6* je u tohoto transformátoru umístěno z důvodu složitějšího tvaru transformátorové nádoby pouze na třech jejích stěnách, což lze vidět v *Příloha 4*. Na dvou delších stranách je umístěno po sedmi stínítkách na každé stěně, což lze vidět v *Příloha 5* a na stěně kratší jsou umístěna pouze dvě stínítka. Stínítka, která jsou zde využita, jsou nazývána jako edgewise shunt. Jejich aktivní část je široká 200 mm. Transformátorové plechy, ze kterých jsou stínítka seskládána, jsou dlouhé 2 200 mm a široké 15 mm. Tyto plechy jsou dohromady staženy za pomoci stahovacího rámu, který je vyroben z obyčejné konstrukční oceli S235JR. Pokud budeme počítat i se stahovacím rámem, tak nám vyjde, že použitá stínítka jsou 2 220 mm vysoká a 220 mm široká. Plechy jsou podpírány u každého stínítka na devíti místech plochou ocelí tloušťky 3 mm, širokou 40 mm a dlouhou 200 mm. Stínítka jsou v místech těchto plochých ocelí připevňována k vnitřní straně transformátorové nádoby s využitím přerušovaného svaru. Ten je pro uchycení stínítek dostačující a zamezí vzniku vzduchové kapsy mezi stínítkem a nádobou. Plochá ocel je ve vzdálenosti 5 mm od nádoby, takže za stínítky vzniká prostor, který je zaplněn transformátorovým olejem, což zvyšuje magnetický odpor mezi stínítkem a nádobou a omezuje přestup magnetického toku ze stínítka do nádoby.

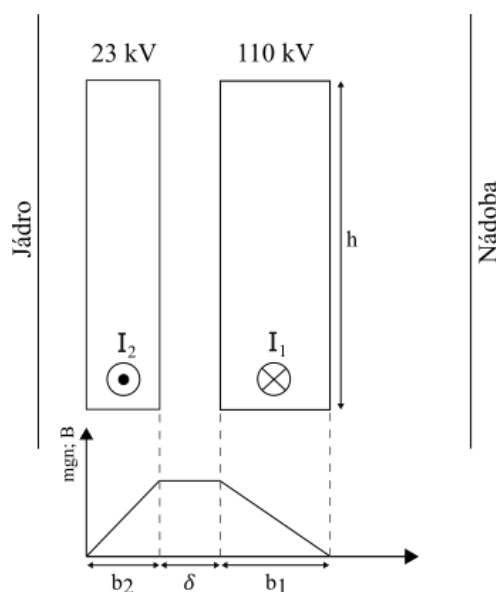
3 Praktické výsledky

Tato kapitola se bude zabírat prakticky změřenými hodnotami na stínítkách transformátoru, hodnotami získanými díky metodě konečných prvků, analytickým výpočtem rozptylového magnetického toku a vzájemným porovnáním takto získaných výsledků.

Terminologie, která se v této kapitole využívá, je následovná. Strana transformátoru, která je napájena 110 kV, je v této práci nazývána jako primární strana (vinutím), strana 23 kV jako sekundární strana (vinutím) a strana 6,3 kV jako terciární strana (vinutím). Pro zjednodušení orientace byla také, jak je i vidět v *Příloha 4*, nejdelší stěna nádoby v následujícím textu označována jako „Stěna 1“ a druhá nejdelší stěna jako „Stěna 2“.

3.1 Analytický výpočet rozptylového magnetického toku

Prvotním krokem praktické části byl výpočet rozptylového toku uzavírajícího se skrze stínítko číslo 4 za pomoci analytického výpočtu. Pro tento výpočet byla geometrie vinutí zjednodušena, jak je vidět na *Obr. 13*. Bylo zanedbáno jak vinutí 110 kV jemné regulace, jelikož nebylo napájeno, tak i terciární vinutí. Vinutí 110 kV hrubé regulace a kmene bylo zjednodušeno do jediného vinutí, které respektuje počet závitů a rozměry obou vinutí.



Obr. 13: Řez zjednodušenou geometrií transformátoru pro analytický výpočet

Následně bylo nutné určit šířku redukovaného kanálu δ_{red} . Skrze tento kanál prochází tok, který se následně uzavírá směrem od magnetického obvodu. Při určení šířky redukovaného kanálu jsem vycházel ze vzorce (3.1) a z teorie, která je uvedena ve zdroji [2, str. 162-165]. Dle této teorie se rozptylový tok uzavírající se směrem od magnetického obvodu vypočítá

dle vzorce (3.3). Tento způsob výpočtu uvažuje, že se skrze jádro uzavírá rozptylový tok, který zabírá pouze s částí sekundárního vinutí, aby bylo dosaženo nulového indukovaného napětí do sekundárního vinutí. Tento způsob výpočtu lze využít z důvodu toho, že transformátor je vybaven terciárním vinutím zapojeným do trojúhelníka, které zapříčiní, že je netočivá složka magnetického toku zatlačena do kanálu mezi vinutí. Díky tomu bude netočivá reaktance blízká reaktanci rozptylové a tím pádem i netočivý magnetický tok bude blízký toku rozptylovému.

$$\delta_{red} = \frac{b_1}{3} + \delta + \frac{b_2}{3} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \delta_{red} &= \frac{b_{1kmen} + b_{1hrubýStupen}}{3} + \delta + \frac{b_2}{3} \\ &= \frac{0,107 + 0,02395}{3} + 0,039 + \frac{0,0845}{3} = 0,11082 \text{ m} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Do základního vzorce pro výpočet magnetického toku dosadíme šířku redukovaného kanálu δ_{red} a střední obvod kanálu O_{medp} za plochu a získáme vzorec pro výpočet celkového rozptylového toku uzavírajícího se směrem od magnetického obvodu vybuzeného cívkami nasazenými na jednom jádru.

$$\begin{aligned} \Phi_{1\sigma} = B_{\sigma} \cdot S_{\sigma} &= \frac{N_1 \cdot I_{1,6n} \cdot \sqrt{2}}{\frac{h}{\mu_0}} \cdot O_{med} \cdot \delta_{red} \\ &= \frac{N_1 \cdot I_{1,6n} \cdot \sqrt{2}}{\frac{h}{\mu_0}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{medp} \cdot \delta_{red} \\ &= \frac{607 \cdot 125 \cdot \sqrt{2}}{\frac{1,35}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,4775 \cdot 0,11082 \\ &= 0,03321 \text{ Wb} = 33,21 \text{ mWb} \end{aligned} \quad (3.3)$$

V dalším kroku se získá část výše vypočítaného toku, která by se v idealizovaném případě uzavírala skrze stínítko číslo čtyři. Aby hodnota tohoto toku mohla být dopočtena, je potřeba si danou situaci zjednodušit a idealizovat. Tento tok se bude uzavírat pouze skrze stínítka, a nikoliv skrze nádobu, a to z důvodu, že se uvažuje, že cesty uzavírající se skrze stínítka, se kterými sousedí cívky nasazené na prostředním jádru, nabývají menšího magnetického odporu nežli cesty skrze nádobu. Díky tomuto zjednodušení se může použít pro zjištění toku skrze stínítko číslo čtyři rovnice (3.5), což je obdoba proudového děliče v elektrických obvodech. Do tohoto vzorce se dosadí jednotlivé magnetické odpory z rovnice (3.4), vykrátí

se permeability, jelikož se bere v úvahu, že tok se uzavírá skrze stejný materiál ve všech směrech. Dále je také vykrácen průřez, vzhledem k tomu, že stínítka mají stejné rozměry.

$$R_{mi} = \frac{l_{si}}{S \cdot \mu_0 \cdot \mu_r} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{st4} &= \frac{\Phi_{1\sigma}}{1 + R_{m4} \cdot \left(\frac{1}{R_{m3}} + \frac{1}{R_{m5}} + \frac{1}{R_{m13}} + \frac{1}{R_{m14}} + \frac{1}{R_{m15}} \right)} \\ &= \frac{\Phi_{1\sigma}}{1 + l_{s4} \cdot \left(\frac{1}{l_{s3}} + \frac{1}{l_{s5}} + \frac{1}{l_{s13}} + \frac{1}{l_{s14}} + \frac{1}{l_{s15}} \right)} \\ &= \frac{0,03321}{1 + 218 \cdot \left(\frac{1}{281,77} + \frac{1}{256,65} + \frac{1}{323,7} + \frac{1}{288} + \frac{1}{347,09} \right)} \\ &= 7,094 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} = 7,094 \text{ mWb} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Pokud využijeme tento způsob, tak vyjde, že rozptylový tok se rovná 33,21 mWb. A následně tok uzavírající se skrze stínítka číslo čtyři by vyšel 7,094 mWb.

Reálně však dochází oproti teorii k tomu, že se větší část vybuzeného rozptylového magnetického toku bude vtahovat do magnetického obvodu, anebo do vinutí na vedlejší sloupku, jak je i vidět z analýzy v *Příloha 13* a *Příloha 14*. Z přílohy lze také vyčíst, že tok, který se uzavírá směrem od jádra, protéká dle analýzy $\frac{2}{3}$ kmene primárního vinutí.

Dle výše zmíněných zjištění byla rovnice pro výpočet redukovaného kanálu (3.1) upravena tímto způsobem. Jelikož z analýzy vyšlo, že rozptylový tok protékající skrze vzduchovou mezeru δ a sekundární vinutí b_2 je vtahován do jádra, tak byla za tyto proměnné dosazena nula. Další úprava je v tom, že tloušťka kmene primárního vinutí bude přenásobena $\frac{2}{3}$, jelikož tok protékající vnitřní $\frac{1}{3}$ tloušťky kmene primárního vinutí se taktéž uzavírá skrze jádro. Výsledná rovnice tedy získá tuto podobu:

$$\begin{aligned} \delta_{red} &= \frac{\frac{2}{3} \cdot b_{1kmen} + b_{1jemnyStupen}}{3} + 0 + 0 = \frac{\frac{2}{3} \cdot 0,107 + 0,02395}{3} \\ &= 0,03176 \text{ m} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Jelikož rozptylový tok se bude uzavírat pouze podél části obvodu vinutí směrem od magnetického obvodu, jak lze i vidět v *Příloha 14*, tak tento fakt musíme respektovat i ve výpočtu. V příloze je také vidět, že délka tohoto obvodu závisí také na tom, na jakém jádru je cívka navinuta. Jelikož počítáme rozptylový tok cívky nasazené na prostředním jádru, tak

bude O_{medp} přenásoben tímto poměrem $\frac{2 \cdot 59^\circ}{360^\circ}$. Po dosazení do vzorce číslo (3.7) vychází, že tento rozptylový tok nabývá velikosti 3,791 mWb.

$$\begin{aligned}
 \Phi_{1\sigma} &= B_\sigma \cdot S_\sigma = \frac{N_1 \cdot I_{10,6n} \cdot \sqrt{2}}{\frac{h}{\mu_0}} \cdot O_{medp} \cdot \frac{2 \cdot 59^\circ}{360^\circ} \cdot \delta_{red} \\
 &= \frac{N_1 \cdot I_{10,6n} \cdot \sqrt{2}}{\frac{h}{\mu_0}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{medp} \cdot \frac{2 \cdot 59^\circ}{360^\circ} \cdot \delta_{red} \\
 &= \frac{607 \cdot 125 \cdot \sqrt{2}}{\frac{1,35}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,58031 \cdot \frac{2 \cdot 59^\circ}{360^\circ} \cdot 0,03176 \\
 &= 0,0037913 \text{ Wb} = 3,791 \text{ mWb}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Následně vychází, že tok uzavírající se skrze stínítko čtyři, nabývá hodnoty 0,8098 mWb.

$$\begin{aligned}
 \Phi_{st4} &= \frac{\Phi_{1\sigma}}{1 + R_{m4} \cdot \left(\frac{1}{R_{m3}} + \frac{1}{R_{m5}} + \frac{1}{R_{m13}} + \frac{1}{R_{m14}} + \frac{1}{R_{m15}} \right)} \\
 &= \frac{\Phi_{1\sigma}}{1 + l_{s4} \cdot \left(\frac{1}{l_{s3}} + \frac{1}{l_{s5}} + \frac{1}{l_{s13}} + \frac{1}{l_{s14}} + \frac{1}{l_{s15}} \right)} \\
 &= \frac{0,0037913}{1 + 218 \cdot \left(\frac{1}{281,77} + \frac{1}{256,65} + \frac{1}{323,7} + \frac{1}{288} + \frac{1}{347,09} \right)} \\
 &= 0,8098 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} = 0,8098 \text{ mWb}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Této hodnoty však v reálném případě nebude tok nabývat, a to z několika důvodů. Prvním důvodem je zjednodušení uvedené na začátku této kapitoly, které bylo provedeno v geometrii a v tom, že se uvažuje, že veškerý vypočtený rozptylový tok se přerozdělí mezi stínítka. Tento tok se však uzavírá kromě stínítek i skrze nádobu. Část tohoto toku se také uzavře již ve vinutí, které ho vybudilo, anebo v prostoru mezi vinutím a stínítky skrze olej. Takže pouze část vypočteného toku se dostane do samotných stínítek. Další důvod, který bych uvedl, je, že při výpočtu rozptylového toku z rovnice (3.7), který se uzavírá směrem od magnetického obvodu, lze těžko určit průřez, jelikož přesně predikovat velikost průřezu, přes který se bude tok v reálu uzavírat, nejde. Ze všeho výše vyplývá, že s využitím tohoto analytického výpočtu se získá tok, kterého by nemělo být v realitě dosaženo.

3.2 Analýza elektromagnetického pole

Model transformátoru byl vytvořen z poskytnutých výkresů od ETD Transformátory a.s. s využitím programu SolidWorks. Následné úpravy geometrie byly prováděny v programu

ANSYS SpaceClaim z důvodu jeho intuitivního a rychlého modelování. Například magnetický obvod prošel pomocí programu ANSYS SpaceClaim největší úpravou geometrie, kdy odstupňované jádro bylo nahrazeno válci *Příloha 7* z důvodu ušetření výpočetních bodů. Vytvořeny byly celkem dvě geometrie, které se mezi sebou lišily pouze tím, že druhá geometrie obsahovala ještě kromě samotného transformátoru, vinutí, nádoby a víka ještě i sedmnáct stínítek.

Ověření účinnosti navrženého stínění bylo provedeno s využitím metody konečných prvků v programu ANSYS Maxwell. Jelikož analýza 3D modelu byla náročná na výpočetní paměť i čas, tak namísto typu řešení „transient“ byl zvolen tzv. „eddy current“. Analýza byla provedena na čtyřech modelech, kdy se modely mezi sebou lišily jak geometrií, tak i způsobem zapojení sekundárního vinutí (RL zátěž X nakrátko). Tyto varianty modelu transformátoru, které byly analyzovány, jsou model bez stínítek s RL zátěží, bez stínítek s nakrátko zapojeným sekundárním vinutím, se stínítky typu edge-wise shunt s RL zátěží a jako poslední analyzovanou variantou je transformátor se stínítky typu edge-wise shunt s nakrátko zapojeným sekundárním vinutím.

Po importování geometrie do programu ANSYS bylo nutné vytvořit okolí, ve kterém docházelo k řešení, to jsem zvolil kvádrového tvaru o offsetu 5 %. Následně bylo potřeba nadefinovat materiály. Okolnímu vzduchu a oleji uvnitř transformátoru byl přiřazen materiál vakuum, jelikož jejich magnetické vlastnosti jsou totožné. Měděnému vinutí a zbylým částem z oceli S235JR byl vybrán předem předdefinovaný materiál z knihovny. Materiál pro jádro a aktivní část stínítek bylo nutné vytvořit, jelikož jej knihovna neobsahovala a byla mu nadefinována magnetizační charakteristika a ostatní parametry dle katalogového listu výrobce plechů typu Power core H 080-23L. Poté následovalo nastavení napájení vinutí, kdy bylo nutné vytvořit a přiřadit coil terminály k jednotlivým vinutím. Jelikož se jedná o transformátor s nevyvedeným terciárním vinutím, tak byl jako způsob napájení vinutí zvolen externí obvod, ve kterém bylo jednoduché terciární vinutí zapojit do trojúhelníka. Výhoda externího obvodu se ukázala také v tom, že se dalo jednoduchým způsobem nastavit, aby při jmenovitém stavu transformátoru neprotékal proud regulačními cívkami tzv. jemnými stupni. Byly vytvořeny dva externí obvody, kdy v prvním případě byl transformátor zatížen takovou RL zátěží, aby sekundární stranou protékal jmenovitý proud a účinník se pohyboval kolem 0,95, tento externí obvod lze vidět v *Příloha 10*. V druhém případě, který je v *Příloha 11*, byla strana 23 kV vykrácena a primární strana byla napájena napětím o takové velikosti, aby sekundární stranou protékal snížený proud ($0,6 \cdot I_n$).

Jelikož rozdíl mezi rozměry nádoby s víkem a tloušťkou jednotlivých plátů, ze kterých je nádoba s víkem vyrobena, je veliký, tak z tohoto důvodu bylo před diskretizací modelu zapotřebí nádobu rozřezat na jednotlivé stěny a s ostatními částmi modelu, kromě vinutí a jádra, jednotlivé části opět rozřezat na tenké plátky, jak je lze i vidět v *Příloha 8*. Díky tomuto kroku se povedlo vytvořit výpočetní síť, která nemusí být na povrchu tolik zjemněná, a i přesto se skrze materiál vešel dostatečný počet elementů tzv. tetraedrů. I přes toto zásadní snížení počtu elementů je stále v modelu bez stínítek celkem 1 512 595 elementů a v modelu se stínítky se vyskytuje celkem 1 607 070 elementů.

Dalšími body nastavení modelu bylo nastavení tzv. „core loss“ a „eddy effects“, kdy v případě modelu transformátoru bez stínění byl povolen výpočet pouze eddy-effects a to u nádoby a víka transformátoru. Pro model transformátoru se stínítky se však situace změnila, a jelikož nás zajímají ztráty vzniklé ve stínítkách, tak pak „core loss“ byly povoleny v plechách, ze kterých jsou sestavena stínítka a v jádru je pořád nepovolujeme, jelikož nás zde v tuto chvíli nezajímají a pouze by komplikovaly výpočet. „Eddy effects“ byly povoleny v masivní nádobě a víku transformátoru, jelikož počítáme, že se budou indukovat vířivé proudy do nádoby s víkem, a jelikož jádro transformátoru a aktivní část stínítek jsou seskládány z plechů, tak si je lehce zidealizujeme a budeme uvažovat, že se sem žádné vířivé proudy neindukují. V řešiči byla nastavena adaptivní frekvence na 50 Hz.

3.2.1 Transformátor bez magnetického stínění

V tomto případě nebyla stínítka připevněna k vnitřní straně nádoby a analýza tohoto modelu sloužila ke zjištění přídavných ztrát v masivních kovových konstrukčních částech a způsobu uzavírání rozptylového magnetického pole.

3.2.1.1 Nakrátko

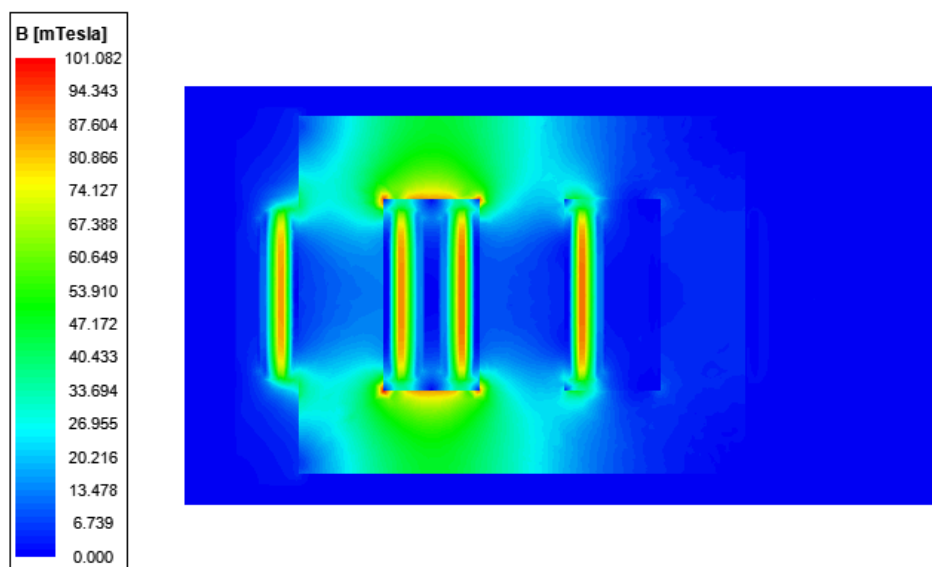
V případě tohoto modelu bylo sekundární vinutí vyzkratováno a napájení primárního vinutí bylo nastaveno na takovou velikost, aby jako při reálném měření na transformátoru nakrátko tekla primárním vinutím proud 125 A. V případě modelu se podařilo nastavit protékající proud skrze primární vinutí o velikosti 124,37 A s využitím napájení primární strany sdruženým napětím o velikosti 7,15 kV, což odpovídá napětí nakrátko 6,5 %. Pokud porovnáme napětí nakrátko při reálném měření, které bylo rovno 7,5 % s napětím při simulaci, tak rozdíl těchto napětí je akceptovatelný.

Z výsledků metody konečných prvků v Maxwelle uvedených v *Tabulka 4* vychází, že ztráty způsobené rozptylovým magnetickým tokem, který se uzavírá skrze transformátorovou nádobu, dosahují hodnoty 1 371,588 W.

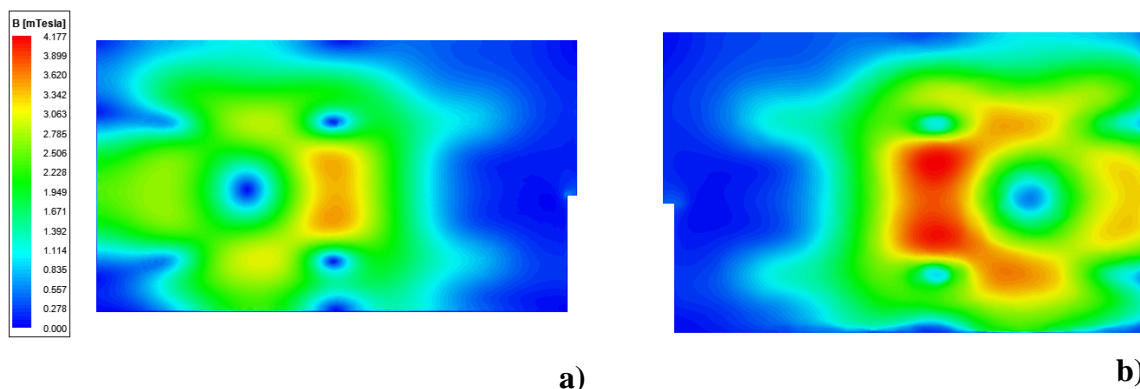
Tabulka 4: Vypočítané ztráty v nádobě a aktivní části (transformátorových plechách) stínítka dopočtené s využitím programu ANSYS Maxwell pro model bez magnetického stínění se sekundární stranou zapojenou nakrátko

$\Delta P_{\text{nádoba}} \text{ (W)}$	1 371,588
$\Delta P_{\text{stínítka}} \text{ (W)}$	0
$\Delta P_{\text{celk}} \text{ (W)}$	1 371,588

Jak lze vidět na *Obr. 15*, tak se rozptylový magnetický tok uzavírá i skrze nádobu, a ne pouze skrze transformátorový olej, a způsobuje tím ztráty v masivní konstrukční oceli, ze které je nádoba vyrobena. Také je zde vidět, že maximální zjištěná hodnota indukce v nádobě se pohybuje kolem 4,18 mT. Z grafického rozložení indukce v nádobě také vyplývá, že jelikož mezera mezi cívkami a stěnou 2 je menší oproti mezeře mezi cívkami a stěnou 1, tak se stěna 2 více sytí a dochází v ní k naindukování větších vířivých proudů, které vedou ke ztrátám o vyšších hodnotách.



Obr. 14: Rozložení magnetické indukce skrze řez jádra transformátoru s vyzkratovaným sekundárním vinutím



Obr. 15: Pohled (u modelu bez stínítek s vyzkratovaným sekundárním vinutím), z vnitřní strany transformátorové nádoby, na rozložení magnetické indukce z vnitřní strany dvou nejdelších stěn: a) stěna 1, b) stěna 2

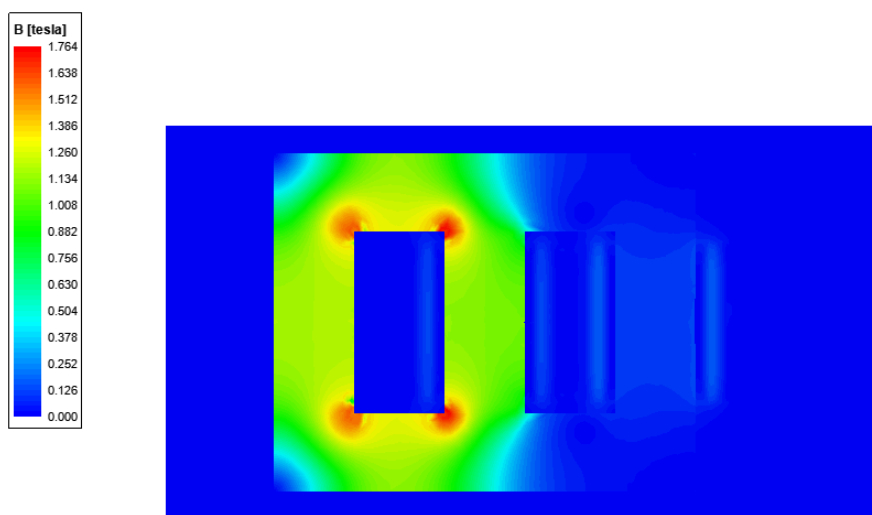
3.2.1.2 S připojenou RL zátěží

Během této simulace bylo sekundární vinutí transformátoru zatíženo RL zátěží. Ta byla takové velikosti, aby protékající proud primárním i sekundárním vinutím se svojí velikostí přiblížil jmenovitým hodnotám a účinník na sekundární straně se pohyboval kolem 0,95. Výsledkem této simulace bylo zjištění hodnoty ztrát i indukce v transformátorové nádobě a rozložení indukce v řezu nádobou, pokud by byl transformátor využíván při jmenovitých hodnotách. Velikost ztrát, dle *Tabulka 5*, v nádobě byla rovna 4 466,215 W.

Tabulka 5: Vypočítané ztráty v nádobě a aktivní části (transformátorových plechách) stínítka získané metodou konečných prvků pro model bez stínítek a připojenou RL zátěží

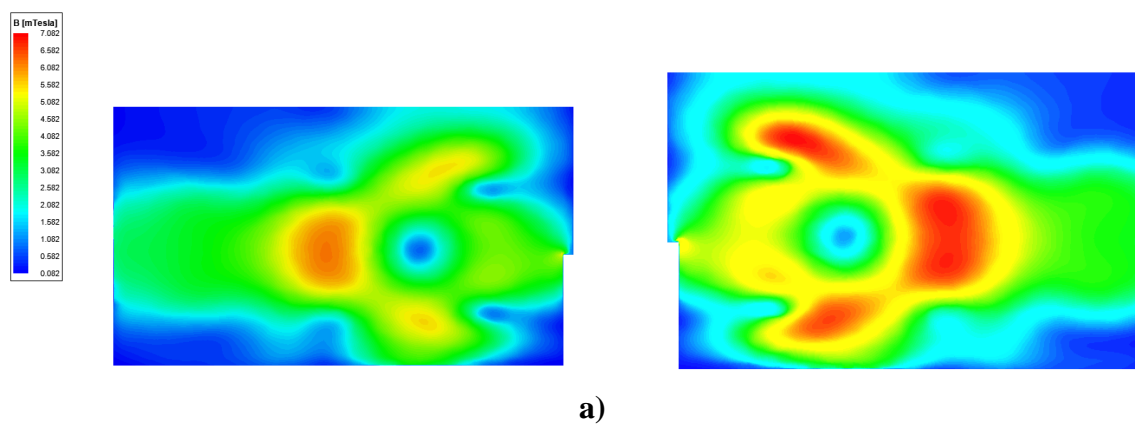
$\Delta P_{\text{nádoba}}$ (W)	4 466,215
$\Delta P_{\text{stínítka}}$ (W)	0
ΔP_{Celk} (W)	4 466,215

Při porovnání *Obr. 14* a *Obr. 16* lze dobře vidět, že při vyzkratování sekundárního obvodu nedochází k nasycení jádra a přivedená energie je opravdu, jak vyplývá i z teorie měření ztrát na transformátoru nakrátko, využita z největší části na krytí Jouleových ztrát v primárním i sekundárním vinutí a přídavných ztrát v konstrukčních částech. Ohledně těchto modelů se tyto přídavné ztráty v konstrukčních částech týkají ztrát v transformátorové nádobě. Na *Obr. 16* si lze také povšimnout toho, že se nejvíce sytí vnitřní rohy a nejméně vnější rohy magnetického obvodu. Tento jev je způsoben tím, že většina magnetického toku se uzavírá nejkratší cestou uvnitř magnetického obvodu. To zapříčiní, že největší hustota magnetického toku se nachází ve vnitřních rozích, a tím pádem zde dochází i k největšímu nasycení, které zde dosahuje lokálních hodnot až kolem 1,77 T.



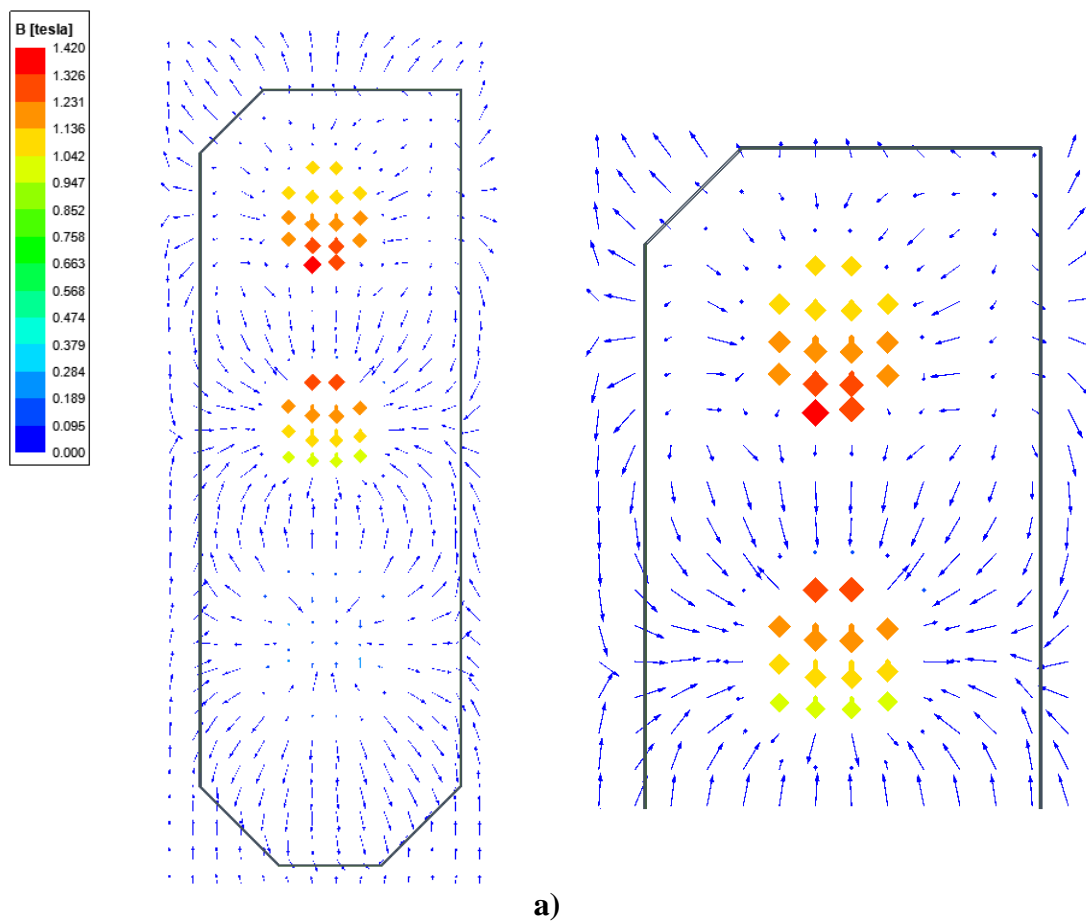
Obr. 16: Rozložení magnetické indukce skrze řez jádra transformátoru s připojenou RL zátěží

Porovnání rozložení magnetické indukce ve stěnách nádoby z *Obr. 15* a *Obr. 17* však neodpovídá tvrzení, že měřením nakrátko zjistíme přídavné ztráty v nádobě způsobené rozptylovým magnetickým tokem. Při zatížení RL zátěží vychází jak sycení, tak ztráty větší než při měření nakrátko. To je způsobeno nižším napětím než napětím nakrátko, a proto byl i proud menší než jmenovitý. Simulace stavu nakrátko byla nastavena také pro nižší napětí než napětí nakrátko a proudy byly též nižší než jmenovité. Tento proud vybudil rozptylové magnetické pole také o menších hodnotách. Proto ztráty a sycení nádoby ve stavu nakrátko jsou menší nežli při zatížení RL zátěží.



Obr. 17: Pohled (u modelu bez stínítek s připojenou RL zátěží), z vnitřní strany transformátorové nádoby, na rozložení magnetické indukce z vnitřní strany dvou nejdelších stěn: a) stěna 1, b) stěna 2

Na *Obr. 18*, je zobrazeno, jakým způsobem se uzavírá magnetický tok skrze nádobu, pokud není transformátor vybaven stíněním.



Obr. 18: Vektory indukce vykreslené v řezu transformátoru bez magnetického stínění ve výšce horní hrany vinutí: a) plný pohled, b) detail

3.2.2 Transformátor s magnetickým stíněním typu edge-wise shunt

V každém ze dvou následujících modelů se již vyskytuje sedmnáct stínítek, která jsou seskládána na hranu. Tyto modely se mezi sebou liší způsobem zatížení sekundárního vinutí.

3.2.2.1 Nakrátko

Díky získaným hodnotám z analýzy 3D modelu, které jsou uvedeny v *Tabulka 6* a jejich následnému porovnání s hodnotami v *Tabulka 4* lze posoudit, že díky přidanému magnetickému stínění na vnitřní stranu nádoby došlo ke snížení ztrát. Tyto ztráty v samotné nádobě klesly o více než $\frac{2}{3}$ z původních ztrát v nádobě. Ale jelikož průchod magnetického toku skrze plechy stínítek způsobuje také ztráty, proto přidáním stínítek do transformátoru narostly ztráty o 50,995 W. A pokud ke sníženým ztrátám v nádobě připočteme ztráty vzniklé z důvodu přidání stínítek do nádoby, tak stále jsme tímto postupem snížili ztráty o 885,37 W vůči předchozímu stavu.

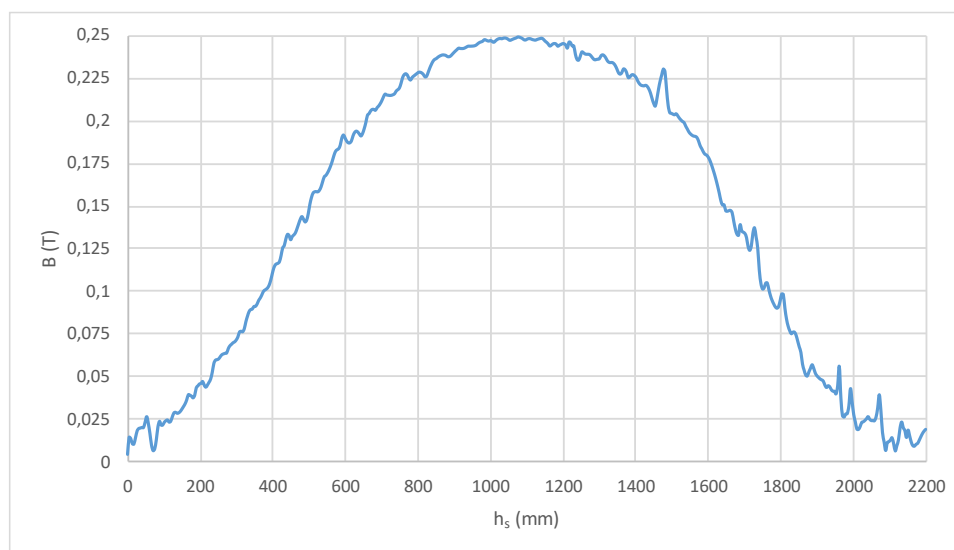
Tabulka 6: Vypočítané ztráty v nádobě a aktivní části (transformátorových plechách) stínítka dopočtené s využitím programu ANSYS Maxwell pro model se stínítky typu edge-wise a se sekundárním vinutím zapojeným nakrátko

$\Delta P_{\text{nádoba}} \text{ (W)}$	435,225
$\Delta P_{\text{stínítka}} \text{ (W)}$	50,995
$\Delta P_{\text{Celk}} \text{ (W)}$	486,220

Z Graf 1 lze vyčíst, že ze simulace vychází, že magnetická indukce a tím pádem i magnetický tok nabývá největších hodnot uprostřed výšky stínítka. To je způsobeno stékáním veškerých vstupujících toků do stínítka uprostřed jeho výšky, čímž dosahuje magnetický tok největší hustoty právě v těchto místech a tím pádem i indukce.

Tabulka 7: Hodnoty indukce získané metodou konečných prvků závislé na vzdálenosti od spodní hrany aktivní části stínítka číslo 4

Značení	h_s (mm)	B (T)
4A	400	0,1120
4B	750	0,2189
4C	1 100	0,2470
4D	1 450	0,2097
4E	1 800	0,0942
4F	2 150	0,0186

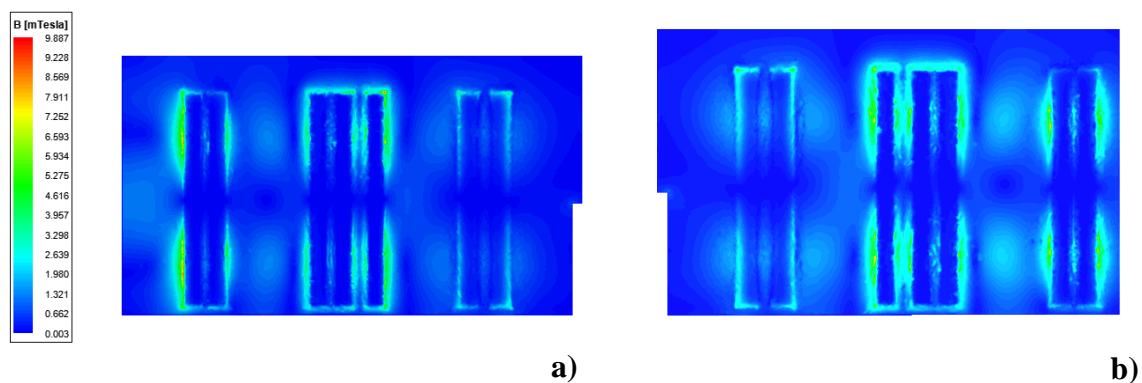


Graf 1: Závislost indukce ve stínítku číslo 4 na vzdálenosti od spodní hrany plechů stínítka získaná metodou konečných prvků pro model se stínítky typu edge-wise v zapojení nakrátko

Pokud budeme porovnávat Obr. 19 a Obr. 20 s Obr. 15, tak je zde dobře vidět, že oproti stavu, kdy stínítka nebyla na nádobě připevněna, došlo k tomu, že z důvodu vyšší magnetické vodivosti aktivní části stínítek oproti stěně nádoby je rozptylový magnetický tok koncentrován do stínítek, a nikoliv do nádoby. V některých místech stínítka dosahuje indukce hodnot až kolem 1,3 T. Jelikož stínítka do sebe stáhla většinu rozptylového

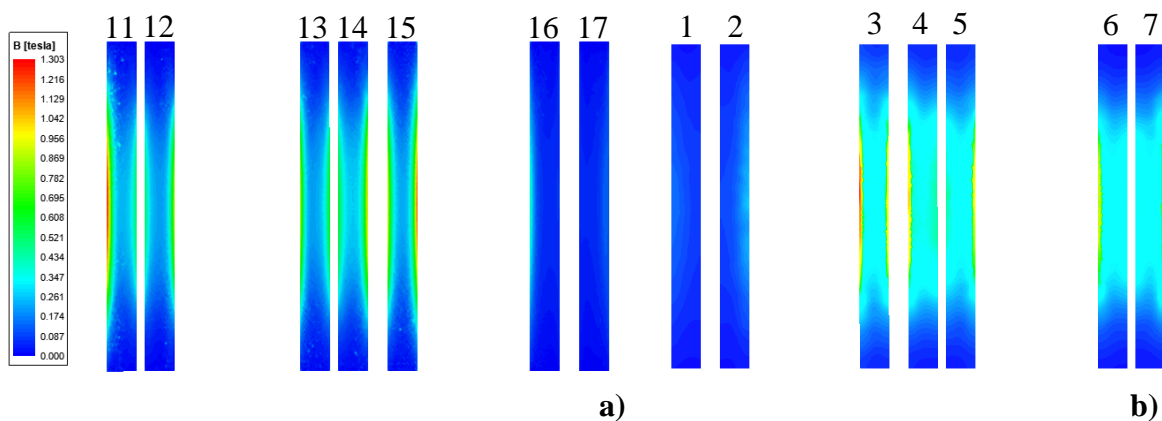
magnetického toku a stáhla ho od nádoby, tak indukce ve stěnách nádoby klesla kromě míst, které přímo sousedí s hranami stínítek. V těchto okrajových místech kolem stínítek indukce v nádobě dosahuje vyšších hodnot nežli ve variantě bez stínítek. Zde se indukce pohybuje v některých místech až kolem 9,88 mT, což je více než dvakrát větší indukce, která se objevovala v nádobě bez stínítek. Z toho důvodu, že stínítka na sebe stahují tento rozptylový tok, dochází také k tomu, že vzdálenější toky se pouze vychýlí od jejich původní trajektorie a uzavřou se skrze nádobu kolem okrajů stínítek, a ne skrze samotná stínítka. V této variantě se stínítka sice dosahuje indukce vyšších hodnot, ale pouze lokálně kolem okrajů stínítek, jinak v ostatních místech stěn nádoby dosahuje indukce nižších hodnot než u varianty bez stínítek, kdy sycení nádoby bylo více rovnoměrně rozložené.

Po prozkoumání *Obr. 20* je zřetelně viditelné, že jsou stínítka nejvíce sycena uprostřed jejich výšky na hranách. Tento jev je zapříčiněn pouze tím, že rozptylový magnetický tok se uzavírá skrze cestu nejmenšího magnetického odporu. Tato cesta vede skrze transformátorový olej nejkratší cestou a poté plechy magnetického stínítka. A jelikož se do stínítek uzavírá vždy rozptylový magnetický tok z nejbližšího okolí, tak nejkratší cesta skrze olej končí na vnějších hranách stínítek. Po vniknutí toku do jednotlivých krajních plechů se z důvodu způsobu jejich skládání tok udržuje v daném plechu (pokud nedojde k jeho přesycení) až do doby, než z něj vystoupí zpět do oleje. U stínítka čtyři na *Obr. 20 b*) je dobře vidět, že se jeho pravá strana sytí méně oproti té druhé, což je způsobeno tím, že se nachází jeho sousedící stínítka čísla 3 dále než stínítka pět. Jelikož je menší mezera mezi stínítky 4 a 5, tak je i rozptylový tok mezi nimi menší a po jeho rozdělení mezi stínítka nedochází k takovému sycení, jako je tomu na hranách mezi stínítky 3 a 4. Stejný efekt lze pozorovat i mezi stínítky 6 a 7 a také mezi stínítky 11 a 12. Zde je vidět, že vždy vnější hrany dvojice se více sytí nežli ty vnitřní, to je zapříčiněno tím, že do vnějších hran se uzavírá tok z většího okolí a nedochází k rovnoměrnému rozdělení, jako tomu je u vnitřních hran stínítek.



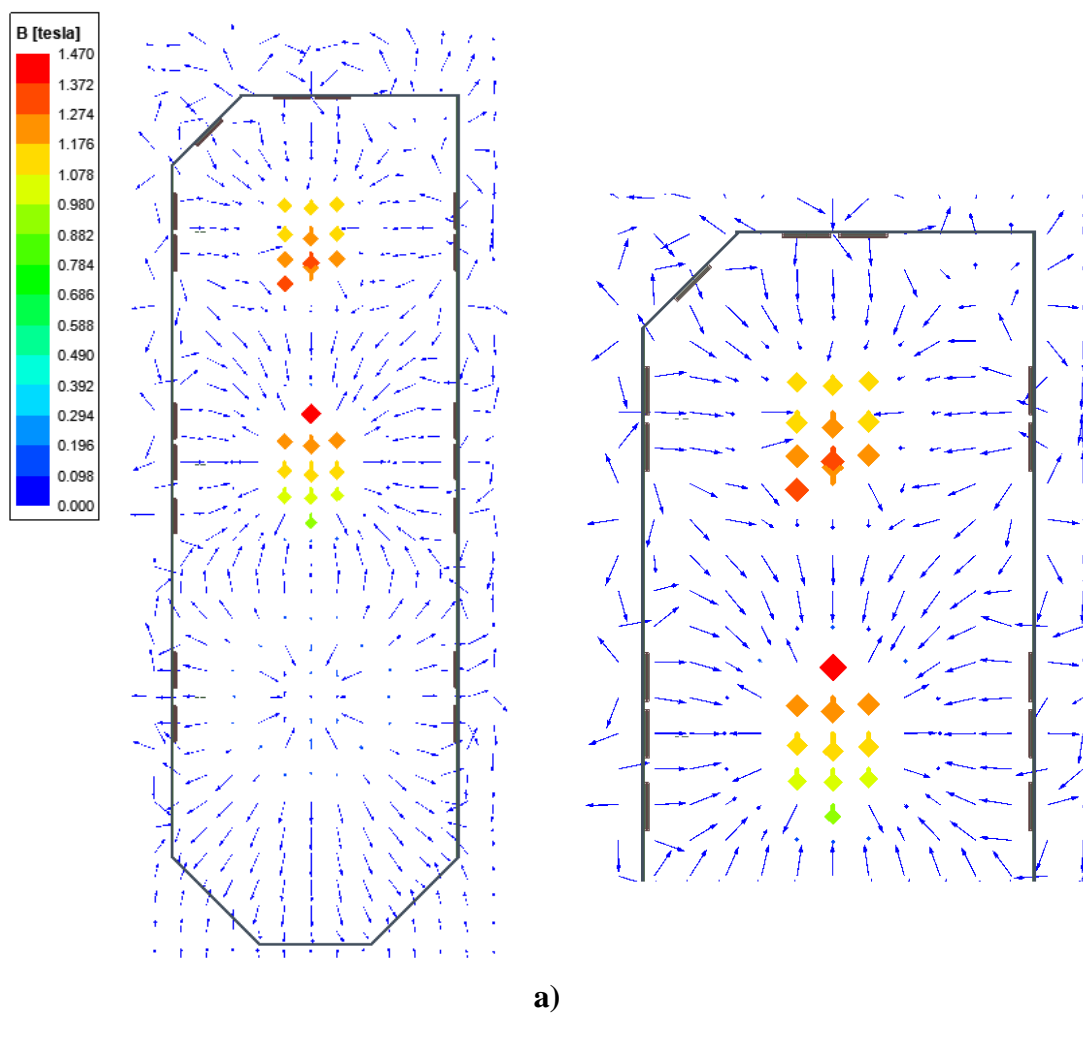
Obr. 19: Pohled (u modelu se stínítka typu edge-wise s vyzkratovaným sekundárním vinutím), z vnitřní strany transformátorové nádoby, na rozložení magnetické indukce z vnitřní strany dvou nejdelších stěn:

a) stěna 1, b) stěna 2



Obr. 20: Pohled (u modelu se stínítka typu edge-wise s vyzkratovaným sekundárním vinutím), z vnitřní strany transformátorové nádoby, na rozložení magnetické indukce u stínítek připevněných na: a) stěna 1 (stínítka 11 až 17), b) stěna 2 (stínítka 1 až 7)

Pokud budeme porovnávat způsob uzavírání rozptylového magnetického toku bez a se stíněním zobrazené v řezu na *Obr. 18* a *Obr. 21*, tak se nám potvrdí domněnka odvozená ze způsobu sycení stínítek a to ta, že blízký rozptylový tok je vtahován směrem do stínítka.



Obr. 21: Vektory indukce vykreslené v řezu transformátoru s magnetickým stíněním ve výšce horní hrany vinutí: a) plný pohled, b) detail

Velikost celkového rozptylového toku zjištěna za využití simulace vychází dle *Tabulka 8* rovna 58,275 mWb. Pokud sečteme veškerý tok uprostřed výšky jednotlivých stínítek, tak vyjde, že celkový tok protékající skrze všechna stínítka se rovná 13,147 mWb, což je 22,56 % z celkového rozptylového toku. Zbylý tok je z převážné části vtahován do magnetického obvodu. Malá část zbylého toku se bude uzavírat skrze nádobu nebo prostor mezi nádobou a vinutím.

Tabulka 8: Vypočítané hodnoty rozptylových toků cívek na jednotlivých jádrech

Číslo cívky	Φ_{σ} (mWb)
1	0,873
2	29,283
3	28,119
Celkem	58,275

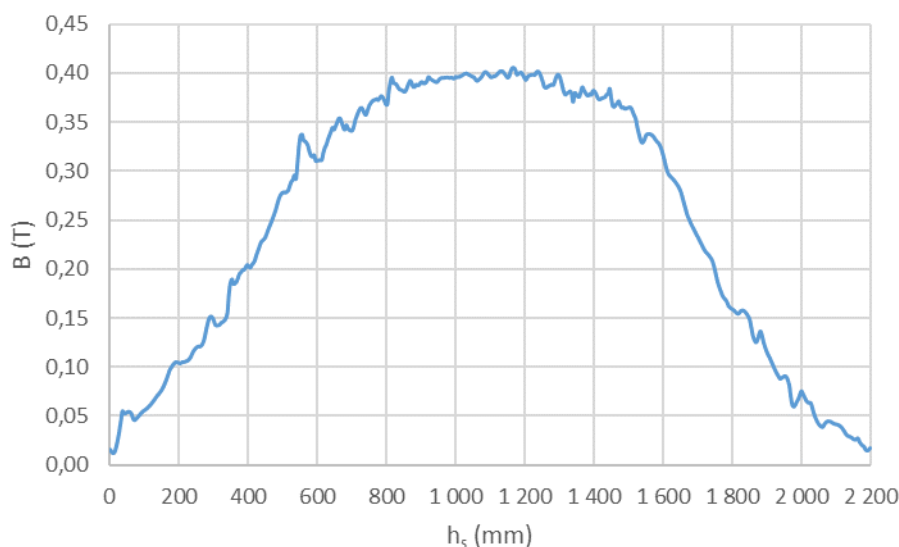
3.2.2.2 S připojenou RL zátěží

Při této analýze transformátoru se stínítka byl transformátor zatížený RL zátěží. Díky použití stínění se ztráty v nádobě snížily ze 4 466,22 W na 1 510,64 W, z čehož vyplývá, že ztráty v nádobě klesly přibližně na $\frac{1}{3}$ ze své původní velikosti, což i odpovídá poměrnému snížení ztrát v nádobě u simulace transformátoru nakrátko. V aktivní části stínítek však vznikají také ztráty způsobené průtokem střídavého rozptylového magnetického toku, kdy tyto dopočtené ztráty ve všech sedmnácti stínítkách nabývají hodnoty 151,55 W. Z toho plyne, že se díky použití magnetických stínítek ušetří 2 804,03 W.

Tabulka 9: Vypočítané ztráty v nádobě a aktivní části (transformátorových plechách) stínítka získané metodou konečných prvků pro model se stínítky typu edge-wise a připojenou RL zátěží

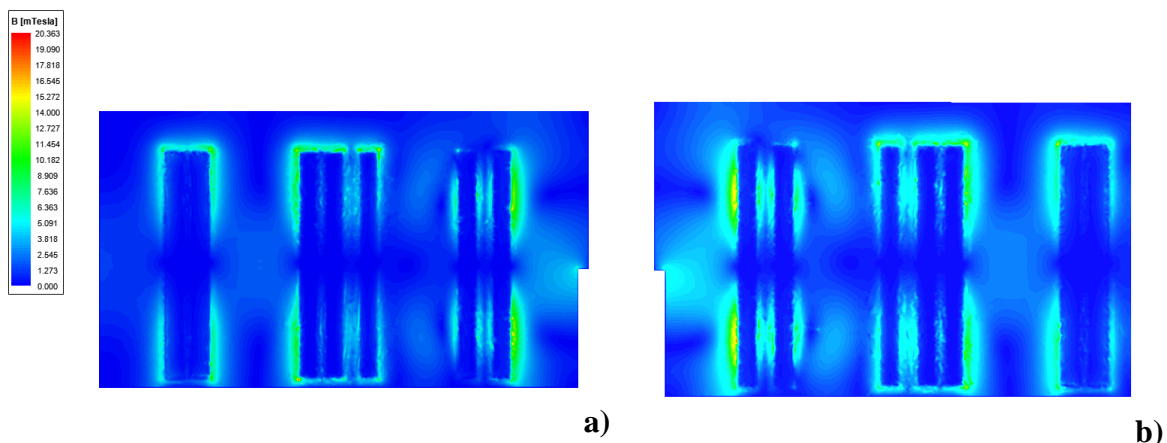
$\Delta P_{\text{nádoba}} \text{ (W)}$	1 510,644
$\Delta P_{\text{stínítka}} \text{ (W)}$	151,545
$\Delta P_{\text{Celk}} \text{ (W)}$	1 662,189

Pokud budeme porovnávat průběhy indukce ve stínítku čtyři u transformátoru nakrátko se sníženým proudem ($0,6 \cdot I_n$) s transformátorem s připojenou RL zátěží o proudu jmenovitém, které jsou uvedeny v *Graf 1* a *Graf 2*, tak lze vidět, že snížený proud se projevil na rozptylovém toku jeho snížením. Důvodem je, že magnetický tok je přímo úměrný magnetické indukci, a jak lze vidět z grafů, tak magnetická indukce u měření nakrátko se sníženým proudem ($0,6 \cdot I_n$), nabývá hodnoty uprostřed stínítka 0,247 T, což je 62% indukce uprostřed stínítka se jmenovitým proudem. Indukce u varianty s RL zátěží nabývá v tomto místě hodnoty 0,398 T. Z toho tedy vyplývá, že jelikož rozptylový magnetický tok, který se uzavírá skrze stínítka, klesl na 62 % oproti variantě se jmenovitým proudem, takže celkový rozptylový tok klesl též na 62 %.

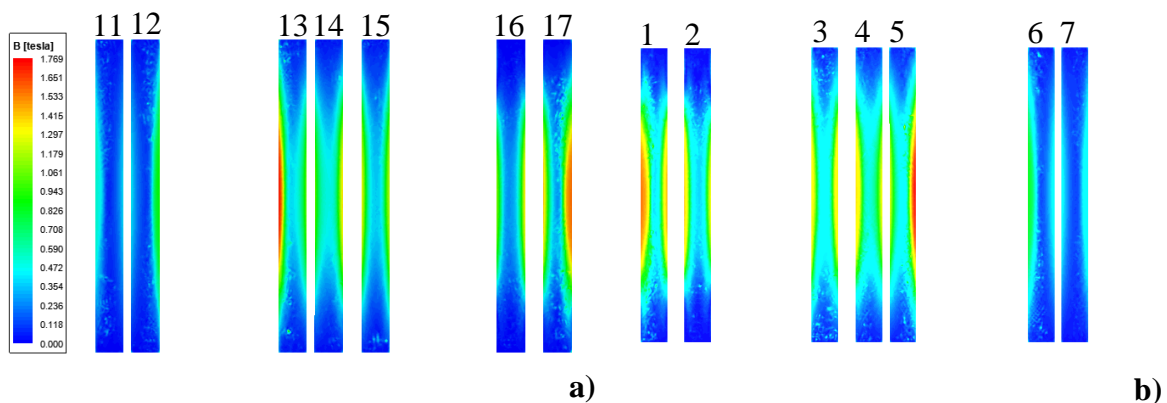


Graf 2: Závislost indukce ve stínítku číslo 4 na vzdálenosti od spodní hrany plechů stínítka získaná metodou konečných prvků pro model se stínítky typu edge-wise s připojenou RL zátěží

Na následujícím *Obr. 22* a *Obr. 23* je opět vidět rozložení indukce v nejdelších stěnách transformátoru a stínítkách k nim připevněným. Po jejich prozkoumání lze vyvodit stejné závěry jako i v předchozí kapitole a to, že stínítka aktivně zachycují, a dokonce i přitahují rozptylový magnetický tok z okolí, který by se bez nich skrze nádobu uzavíral. Tato domněnka je potvrzena tím, že pokud se porovná indukce ve stínítkách *Obr. 23* a indukce v nádobě bez těchto stínítek *Obr. 17*, tak lze zřetelně poznat, že indukce ve stínítkách nabývá hodnot vyšších nežli ve stěnách transformátoru bez použití stínítek. Z toho lze usoudit, že hustota magnetického toku, který se uzavírá skrze stínítko, je větší, a tato situace může nastat jedině tehdy, když skrze stínítko protéká i tok, který se u varianty bez stínítek uzavíral skrze nádobu v místech, kde se stínítko nevyskytuje.

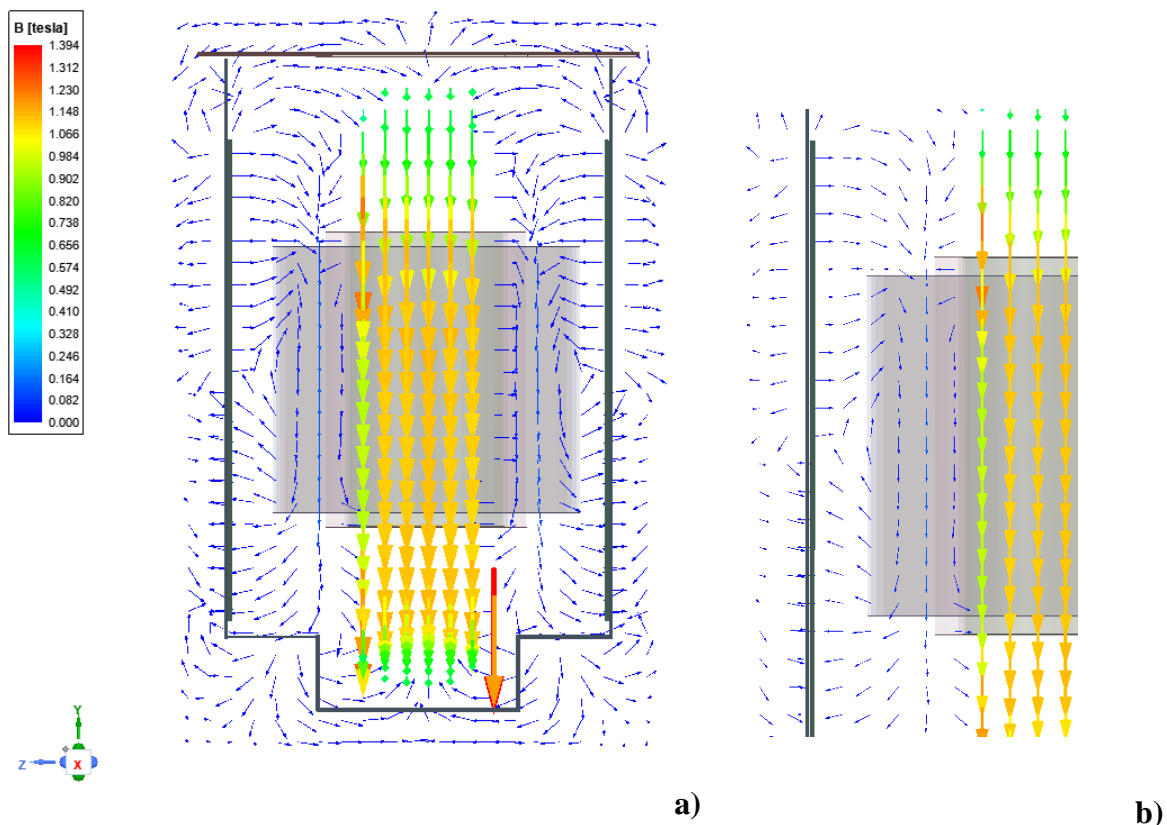


Obr. 22: Pohled (u modelu se stínítky typu edge-wise s připojenou RL zátěží), z vnitřní strany transformátorové nádoby, na rozložení magnetické indukce z vnitřní strany dvou nejdelších stěn: a) stěna 1, b) stěna 2



Obr. 23: Pohled (u modelu se stínítky typu edge-wise s připojenou RL zátěží), z vnitřní strany transformátorové nádoby, na rozložení magnetické indukce u stínítek připevněných na: a) stěna 1 (stínítka 11 až 17), b) stěna 2 (stínítka 1 až 7)

Z Obr. 24 lze vyčíst, jak rozptylový magnetický tok protéká mezi primárním a sekundárním vinutím a následně se část vrací zpět do magnetického obvodu. Zbylá část rozptylového magnetického toku se však uzavírá skrze nádobu a stínítka. Jak již bylo zmíněno dříve, je díky použitým stínítkům velká část rozptylového magnetického toku uzavřena skrze plechy stínítka namísto nádoby, čímž se snížila velikost vířivých naindukovaných proudů do stěn nádoby, které způsobovaly dodatečné ztráty v transformátoru. Tyto ztráty byly sníženy, ale tok uzavírající se skrze stínítka způsobil vybuzení hysterezních ztrát v plechách stínítek, které byly způsobeny opakovanou změnou směru magnetického toku.



Obr. 24: Vektory indukce vykreslené: a) v řezu transformátorem vedeném středem stínítka číslo čtyři a b) detail na stínítka tohoto řezu

3.3 Měření transformátoru nakrátko

Toto měření bylo provedeno na transformátoru se sedmnácti stínítky typu edge-wise shunt při teplotě okolí 20 °C. Vinutí 23 kV bylo vykráceno a transformátor byl napájený na primární straně sníženým napětím, které nabývalo sdružené hodnoty 8,242 kV a primárním vinutím protékal proud 125 A. Z čehož vyplývá, že zkouška nakrátko byla provedena za sníženého primárního napětí, a i sníženého proudu jak v primárním, tak sekundárním obvodu. Měření bylo provedeno tímto způsobem, protože se díky tomu docílí úspory nákladů na elektrickou energii a norma ČSN 60076-1 toto snížení dovoluje, jelikož lze výsledky extrapolovat na jmenovitou hodnotu. Transformátor byl během zkoušky zalit v oleji, tak jako tomu bude v běžném provozu a po dokončení byl olej vypuštěn, aby bylo možné provizorní cívky ze stínítek odvinout.

Bylo změřeno indukované napětí do cívek navinutých na všech sedmnácti stínítkách. V případě stínítka číslo čtyři bylo měřeno indukované napětí do šesti cívek, které byly navinuty na stínítku. Tyto cívky, jak lze i vidět v *Tabulka 11* jsou rovnoměrně rozmístěny 400 mm od spodní hrany aktivní části (plechů) stínítka směrem nahoru. V případě ostatních stínítek bylo měřeno indukované napětí vždy pouze do jedné cívky, která se nacházela

1 450 mm nad spodním okrajem aktivní části stínítka. Měřicí cívky o dvou závitech navinutých na stínítkách byly ze zvonkového drátu o průřezu $0,5 \text{ mm}^2$.

Z naměřených naindukovaných napětí do provizorních cívek byla s využitím vzorce (3.9) vypočítána magnetická indukce ve všech sedmnácti stínítkách. A následně s využitím vzorce (3.10), kdy za obsah byl dosazen průřez stínítka, byl dopočten i tok.

$$B = \frac{U_{is}}{N_s \cdot S_s \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \quad (3.9)$$

$$\Phi = B \cdot S \quad (3.10)$$

Z výsledků praktického měření na stínítkách transformátoru vyplývá, že největší změřená indukce se vyskytuje ve stínítkách 1, 10 a 17. To je způsobeno tím, že se jedná o krajní stínítka, přes která se uzavírá rozptylový magnetický tok z většího prostoru, jelikož se zde nenachází další stínítka, které by pomohlo k přerozdělení rozptylového magnetického toku. A jelikož stínítka představuje menší magnetický odpor nežli stěna nádoby transformátoru, tak se i vzdálenější rozptylový magnetický tok uzavře skrze stínítka nežli nádobu, která je mu blíže.

Pokud se budou porovnávat změřené indukce ve stínítkách znázorněné v *Graf 4*, které se nacházejí přímo proti sobě přes transformátor, tak při prvním pohledu lze vidět, že změřené průběhy se navzájem kopírují, ale po celou dobu nabývají stínítka na jedné straně menších hodnot indukce. Tento úkaz je způsoben pouze tím, že osa magnetického obvodu a nádoby není stejná. Magnetický obvod je blíže posunut ke stěně nádoby, ke které jsou připevněna stínítka 1 až 7, což je i ukázáno v *Příloha 4*. Jelikož magnetický odpor je úměrně závislý na vzdálenosti dle rovnice (3.11), tak rozptylový magnetický tok na straně stínítek 1 až 7 musí překonávat menší magnetický odpor, čímž zde i protéká větší rozptylový magnetický tok dle rovnice (3.12). A jak je vidět i z rovnice (3.13), tak indukce je závislá na protékajícím magnetickém toku. Jelikož tedy stínítka 1 až 7 protéká z důvodu menšího magnetického odporu větší magnetický tok, tak v nich byla změřena i větší magnetická indukce vůči stínítkům 11 až 17. Ze stejného grafu také vyplývá to, že oproti ostatním protilehlým stínítkům je rozdíl u změřené indukce mezi stínítkem 7 a 11 menší. To je zapříčiněno tím, že jelikož stínítka 11 nemá z obou stran v blízké vzdálenosti další stínítka, jako má protilehlé stínítka 7, ale má pouze z jedné strany, tak se skrze něj uzavírá rozptylový magnetický tok z většího okolí, oproti stínítku 7, kdy se tento rozptylový magnetický tok přerozdělí mezi stínítka 7 a 8.

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S} \quad (3.11)$$

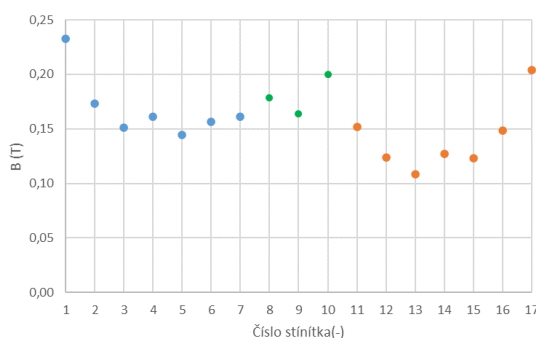
$$\Phi = \frac{N \cdot I}{R_m} \quad (3.12)$$

$$B = \frac{\Phi}{N \cdot S} \quad (3.13)$$

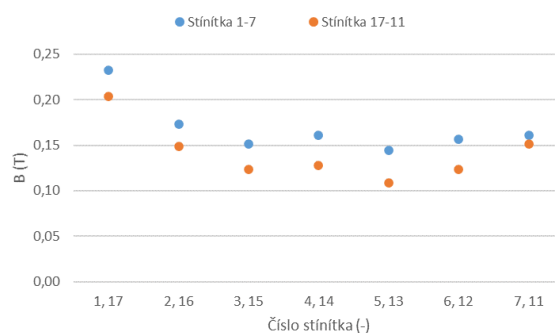
Z důvodu toho, že stínítka 1 a 17 jsou nejkrajněji umístěná, a nejsou zde z jedné strany žádná blízká další stínítka, tak se skrze ně uzavírá celý magnetický rozptylový tok v dosahu, jelikož se nemůže přerozdělit mezi více stínítek. Jelikož stínítka 1 a 17 jsou blíže jádru nežli stínítka 2 a 16, tak se sytí více a jedná se tedy o nejvíce sycené stínítka dle tohoto měření a druhým nejvíce syceným stínítkem je stínítka 10. U tohoto nejvíce syceného stínítka bylo naměřeno 0,2326 T. Třetím nejvíce syceným stínítkem je dle Graf 3 stínítka 10, což je způsobeno tím, že je mezi stínítky 10 a 11 velká mezera a oproti stínítku 11 se nachází blíže cívkám, a tak jím protéká větší magnetický tok a dochází k většímu sycení.

Tabulka 10: Změřené hodnoty indukovaných napětí do dvou závitů navinutých přibližně uprostřed všech stínítek a tyto napětí dopočítané indukčnosti a magnetické toky

U (V)	B (T)	Φ (mWb)	U (V)	B (T)	Φ (mWb)	U (V)	B (T)	Φ (mWb)	U (V)	B (T)	Φ (mWb)	U (V)	B (T)	Φ (mWb)
1			2			3			4D			5		
0,438	0,233	0,698	0,327	0,173	0,520	0,285	0,151	0,453	0,304	0,161	0,483	0,272	0,144	0,432
6			7			8			9			10		
0,295	0,156	0,469	0,304	0,161	0,484	0,337	0,179	0,536	0,308	0,164	0,491	0,377	0,200	0,599
11			12			13			14			15		
0,286	0,152	0,455	0,233	0,124	0,371	0,204	0,108	0,325	0,240	0,127	0,382	0,232	0,123	0,369
16			17											
0,280	0,149	0,446	0,384	0,204	0,611									



Graf 3: Závislost změřené indukce ve výšce 1 450 mm od spodní hrany plechů stínítka u jednotlivých stínítek



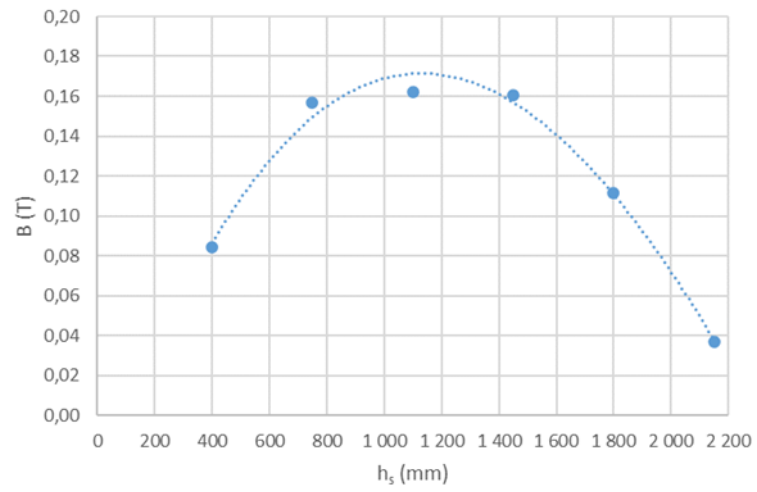
Graf 4: Porovnání změřené indukce ve stínítkách nacházejících se naproti sobě

Stínítka číslo čtyři bylo zvoleno pro měření indukce v celkem šesti místech s konstantní vzdáleností mezi sebou. Z provedeného měření vyplývá dle *Graf 5*, že největší indukce se nachází uprostřed výšky stínítka a činí 0,1621 T, což podporuje myšlenku, která byla zmíněna v kapitole 1.3.1 *Magnetické stínění* u odstupňovaných plechů stínítek optimum width-wise shunt. A to ta, že uprostřed výšky stínítek se nachází největší hustota magnetického toku, jelikož se zde stékají magnetické toky vstupující v různých místech do stínítka, jako je radiální a axiální rozptylový magnetický tok. Z proložení polynomem třetího stupně v *Graf 5* také vyplývá, že čím se jde více k hornímu i spodnímu konci stínítek, tak indukce klesá, což je způsobeno právě tím, že do konců stínítek vstupuje pouze radiální rozptylový magnetický tok.

Tabulka 11: Změřené hodnoty indukovaného napětí do dvou závitů navinutých v různých vzdálenostech od spodní hrany plechů stínítka a pro ně dopočítané indukce

Značení	h_s (mm)	U (V)	B (T)
4A	400	0,1589	0,0843
4B	750	0,2953	0,1567
4C	1100	0,3055	0,1621
4D	1450	0,3030	0,1608
4E	1800	0,2100	0,1114
4F	2150	0,0697	0,0370

Pokud budeme porovnávat reálné měření nakrátko se simulací tak, jak je vidět z grafů *Graf 1* a *Graf 5*, tak indukce zjištěná s využitím výpočetního programu dosahuje vyšších hodnot. Jedná se totiž o model, který je oproti realitě zjednodušený a chybí zde kostra magnetického obvodu, která je také magneticky vodivá a nachází se mezi magnetickým obvodem a cívkami. Tento fakt zapříčinil to, že u modelu se skrze stínítka uzavírá i část rozptylového toku, která se však v realitě uzavírá skrze tuto chybějící kostru a nevstupuje do stínítek. Jelikož je magnetická indukce dle rovnice (3.13) závislá na velikosti protékajícího magnetického toku, a protože se u vypočítaného modelu uzavírá větší tok skrze stínítka, tak vychází u modelu i vyšší hodnota indukce. Pokud ale porovnáme tvar průběhů v grafech, tak je podobný a maxima dosahují oba dva ve výšce aktivní části stínítka rovné 1 100 mm.



Graf 5: Závislost změřené indukce ve stínítce číslo 4 na vzdálenosti od spodní hrany plechů stínítka

Zhodnocení a závěr

Za pomoci CAD softwarů byly vytvořeny dvě geometrie transformátorů, na které byla aplikována metoda konečných prvků. Prvotní plán počítal s vytvořením takového modelu, kde by byly výsledky co nejpřesnější. K tomu by byla nutná co nejjemnější mesh a co nejpřesnější tvar nádoby, stínítek s rámem a největších konstrukčních částí uvnitř nádoby transformátoru. Takový model bohužel dokáže na fakultě vypočítat pouze výpočetní server Condor, který je některá období v roce velmi vytížený. Právě z důvodu dlouhodobého vytížení Condoru jsem byl donucen model zjednodušit, jak odstraněním konstrukčních částí uvnitř nádoby a rámu stínítek, tak zjednodušením výpočetní sítě modelu. Vzhledem k tomu, že nádoba transformátoru má složitý tvar a osy nádoby a magnetického obvodu nejsou totožné, nebylo možno využít žádnou osu symetrie, která by umožnila zkvalitnění výpočtu.

Výsledky získané simulacemi ověřily nutnost využívání magnetického stínění na vnitřní straně transformátorové nádoby. Díky jeho využití byly přídavné ztráty způsobené rozptylovým magnetickým polem, které se uzavírá skrze zmíněnou nádobu, sníženy na $\frac{1}{3}$ z jejich původní hodnoty bez použití stínění.

Při detailnějším porovnávání naměřených indukcí ve stínítku číslo čtyři s hodnotami získanými simulací v tomtéž stínítku vychází, že tvar průběhu indukce je podobný, ale získaná indukce simulací nabývá po celé délce vyšších hodnot. Tento rozdíl zapříčinily hned dva důvody. Tím prvním je nedostatečná kvalita výpočetní sítě, která způsobí odchylku výsledků a tím druhým je, že v modelu se nevyskytují všechny konstrukční části, které jsou v reálném transformátoru při provedeném měření. Skrze tyto konstrukční části se totiž v reálu uzavře část rozptylového toku, který se v modelu uzavírá skrze stínítka. Tyto rozdíly oproti reálně změřeným datům by se daly snížit využitím výpočetního serveru Condor. Ohledně uzavírání rozptylového toku stínítkem byla simulací i reálným měřením také ověřena teorie, že uprostřed stínítka se bude nacházet největší hustota toku. Pokud porovnáme získaný magnetický tok uvnitř stínítka číslo čtyři v místě největší hustoty toku různými metodami, které se nachází v *Tabulka 12*, zjistíme, že největší tok byl vypočítán za pomoci analytického výpočtu i přesto, že byl výpočet poupraven. Nejmenší tok byl reálně odměřený na stínítku. Odchylka analytického výpočtu od reálného měření byla zapříčiněna zjednodušením geometrie a tím, že nelze přesně predikovat průřez, skrze který bude tento tok procházet v oblasti vinutí. Chybu do výpočtu také zaneslo to, že bod zlomu, kde se rozptylový tok započne uzavírat od magnetického obvodu je zvolen pouze přibližně, a to

z vektorového rozložení indukce získaného pomocí ANSYSu, který nemá příliš kvalitní síť. Získané hodnoty programem ANSYS se liší od změřených hodnot z toho důvodu, že se výpočet oddaloval od reality kvůli různým zjednodušením a že byla použita nedostatečně kvalitní výpočetní síť. Zjednodušeními je například myšleno zanedbání kostry magnetického obvodu a rámu stínítek. Výsledky se dle pořadí v *Tabulka 12* liší v poměru 100 %:92,12 %:60,02 %.

Tabulka 12: Porovnání získaných magnetických toků uvnitř stínítka číslo čtyři různými metodami

	Φ_{st4} (mWb)
Analytika	0,8098
ANSYS	0,746
Měření	0,486

Když byla porovnána změřená data na stínítkách s informacemi ze simulace, vyšlo, že krajní stínítka se sytí více nežli stínítka obklopená dalšími stínítky. Důvodem je rozdělení rozptylového toku, který se skrze ně uzavírá. Simulací bylo také ověřeno, že stínítka do sebe stahují rozptylový tok z okolí, což zapříčiní i větší sycení krajních plechů stínítek. Ze simulace lze také zjistit, že i když je použita transformátorová nádoba, tak lze naměřit malý rozptylový tok i vně nádoby.

Velký pokles přídavných ztrát v nádobě přikládám tomu, že stínění odpovídá výše zmíněným požadavkům, že vzdálenost mezi vertikálními stínítky je dostatečně malá a jejich rozložení na dlouhých stěnách nádoby je podobné uvedenému na *Obr. 10* v teoretickém úvodu. Ke zlepšení účinnosti stínění rozptylového magnetického toku by mělo vést využití magnetického stínění yoke. Jelikož část rozptylového toku se uzavírá i skrze víko a dno nádoby, což lze vidět v *Příloha 12*, a i když stínítka připevněná ke stěnám snížila rozptylový tok uzavírající se skrze víko a dno, tak stínítka yoke by zapříčinila jeho další pokles a tím i další pokles ztrát. Ze stejné přílohy lze i vyčíst, že dosavadní stínění nedokáže dostatečně odklonit rozptylový tok uzavírající se skrze lomenou stěnu neosazenou stíněním. Přidání alespoň dvou zkrácených stínítek na spodní část lomené stěny by mohlo tento problém vyřešit.

Toto téma by se dalo ještě rozšířit a obohatit o zpřesnění výsledků již připravených modelů za pomoci výpočetního serveru Condor. Jelikož nebyl znám přesný typ transformátorových plechů, ze kterých jsou seskládána stínítka, mohla by být práce rozšířena o zjištění, jaké kvality byly použité plechy. Zajímavé by mohlo také být ověření důvodu, proč jsou skládány plechy magnetických stínítek na hranu namísto naplocho. Či ověřit návrh

vybavení transformátoru o magnetické stínění yoke nebo stínění lomené stěny, které by snížilo rozptylový magnetický tok uzavírající se skrze nádobu a tím i ztráty.

Literatura

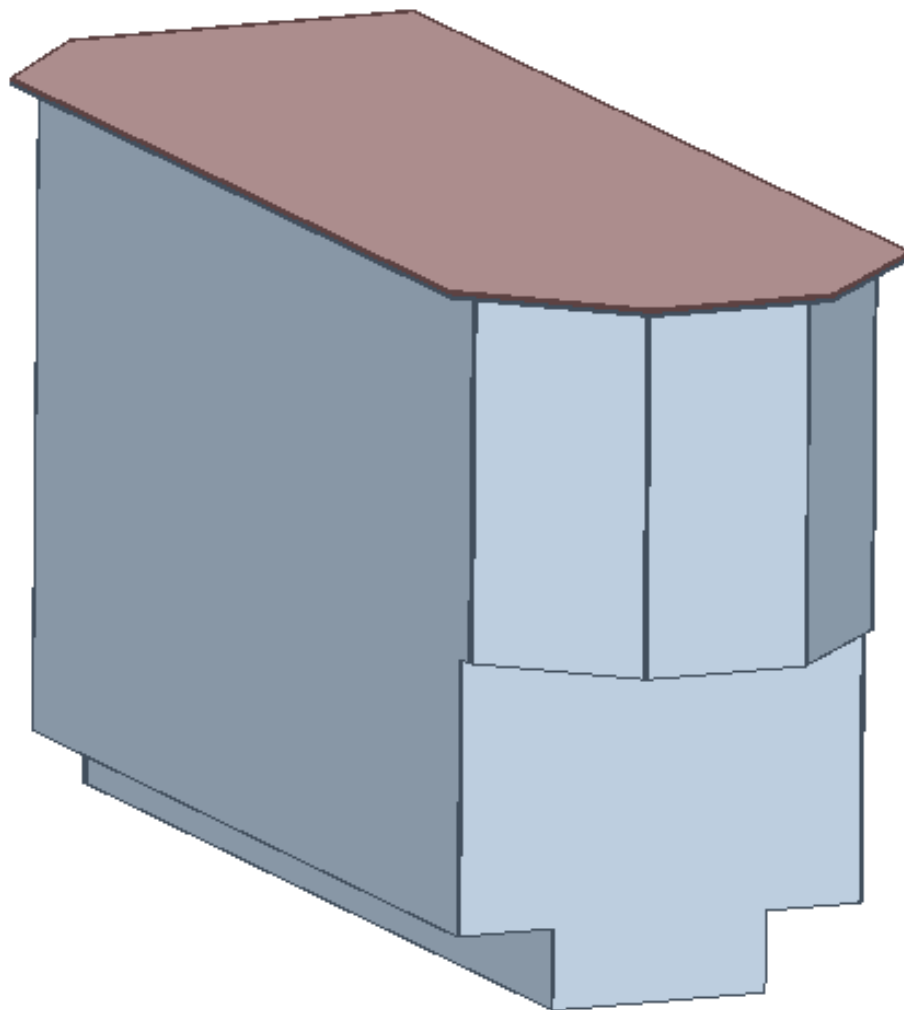
- [1] JEZIERSKI, Eugeniusz. *Transformátory*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1973. 650 s.
- [2] BAŠTA, Jan, CHLÁDEK, Jaroslav a MAYER, Imrich. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1968. 582 s.
- [3] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958. 714 s.
- [4] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 1: úvod-transformátory*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1980. 385 s.
- [5] BARTOŠ, Václav et al. *Elektrické stroje*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006. 139 s. ISBN 80-7043-444-9.
- [6] KLOUDA, Ondřej. *Vliv konstrukce magnetického obvodu na indukčnost a ztráty tlumivky*. Plzeň, 2020. Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky. Vedoucí práce Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.
- [7] MAYER, Daniel. *Aplikovaný elektromagnetismus: úvod do makroskopické teorie elektromagnetického pole pro elektrotechnické inženýry*. 2. vyd. České Budějovice: Kopp, 2012. 538 s. ISBN 978-80-7232-436-1.
- [8] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a cívký*. 1. vyd. Praha: BEN, 1999. 393 s. ISBN 80-86056-49-X.
- [9] KULKARNI, S. V. a KHAPARDE, S. A. *Transformer engineer: design and practice*. New York: Marcel Dekker, ©2004. xiv, 476 s. Power engineering. ISBN 0-8247-5653-3.
- [10] KUBÍK, Zdeněk. *Elektromagnetická kompatibilita: Stínění proti elektromagnetickým polím*. [online PowerPoint prezentace] Plzeň: ZČU FEL. [cit. 13. 11. 2021] Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kev/emc/studijni-materialy.html>
- [11] Elektrotechnická ocel. *Therma FM* [online]. [cit. 2022-02-13]. Dostupné z: <http://thermafz.cz/magneticke-obvody-z-elektrotechnicke-oceli/elektrotechnicka-ocel/>
- [12] Nařízení komise (EU) č. 548/2014. *EUR Lex* [online]. [cit. 2022-02-21]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:02014R0548-20170109&qid=1488961146874&from=CS>
- [13] PACHOLÍKOVÁ, Lucie. *Dopad nařízení Komise č. 548/2014 o zavedení Direktivy 2009/125/ES (EcoDesign) na ekonomiku distribuční společnosti*. Praha, 2018, Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická,

Katedra ekonomie, manažerství a humanitních věd. Vedoucí práce Ing. Radek
Hanuš, Ph.D.

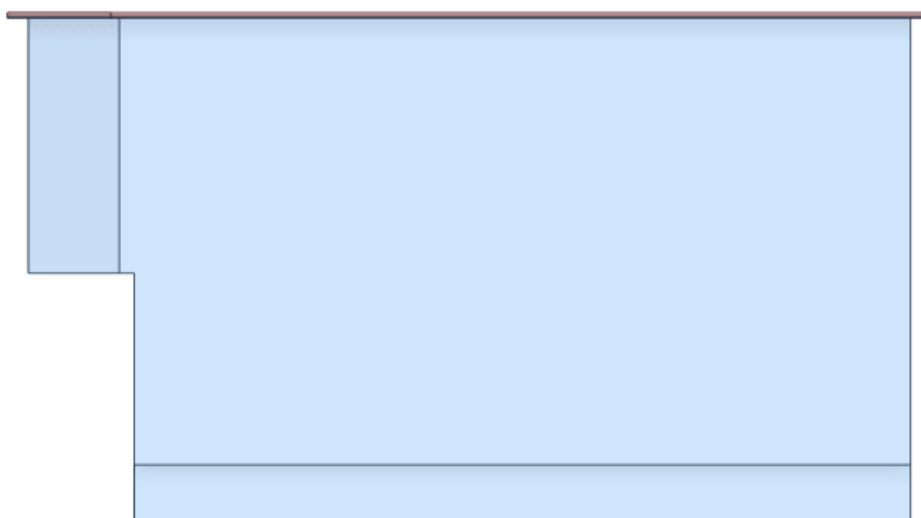
Přílohy

Seznam příloh

Příloha 1: Model nádoby transformátoru 40 MVA ER33M-0	II
Příloha 2: Pohled z boku na model nádoby transformátoru 40 MVA ER33M-0	II
Příloha 3: Pohled shora na model nádoby transformátoru 40 MVA ER33M-0	III
Příloha 4: Pohled do transformátoru s očíslovanými stínítky, jádry a stěnami	III
Příloha 5: Řez transformátorové nádoby s připevněnými stínítky	IV
Příloha 6: Geometrie stínítka: a) zjednodušená, b) původní.....	V
Příloha 7: Zjednodušená a původní geometrie magnetického obvodu: a) pohled zepředu b) shora c) shora v řezu uprostřed sloupků transformátoru	VI
Příloha 8: Detail nádoby a víka: a) geometrie před rozřezáním, b) po rozřezání	VI
Příloha 9: Umístění stínítek vůči magnetickému obvodu a cívkám: a) pohled z čela, b) z boku	VII
Příloha 10: Externí obvod pro jmenovité napájení transformátoru a jeho zatížení pomocí RL zátěže	VII
Příloha 11: Externí obvod transformátoru se zapojeným sekundárním vinutím nakrátko	VIII
Příloha 12: Pohled na vnitřní nejdlejší stranu transformátorové nádoby, dno a jedinou stěnu bez stínítek: a) bez stínítek s RL zátěží, b) se stínítky s RL zátěží	VIII
Příloha 13: Vektory indukce v řezu uprostřed vinutí u transformátoru s vyzkratovaným sekundárním vinutím	IX
Příloha 14: Rozložení vektorů indukce v řezu u transformátoru se stínítky s vyzkratovaným sekundárním vinutím (vlevo). Výseče primárního vinutí, budící rozptylový magnetický tok, který se bude uzavírat směrem od magnetického obvodu (vpravo)	X



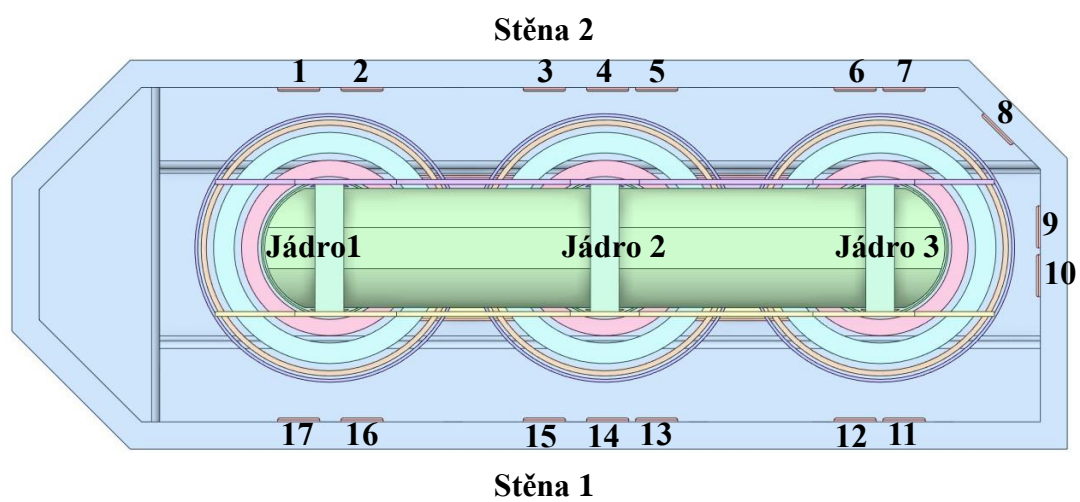
Příloha 1: Model nádoby transformátoru 40 MVA ER33M-0



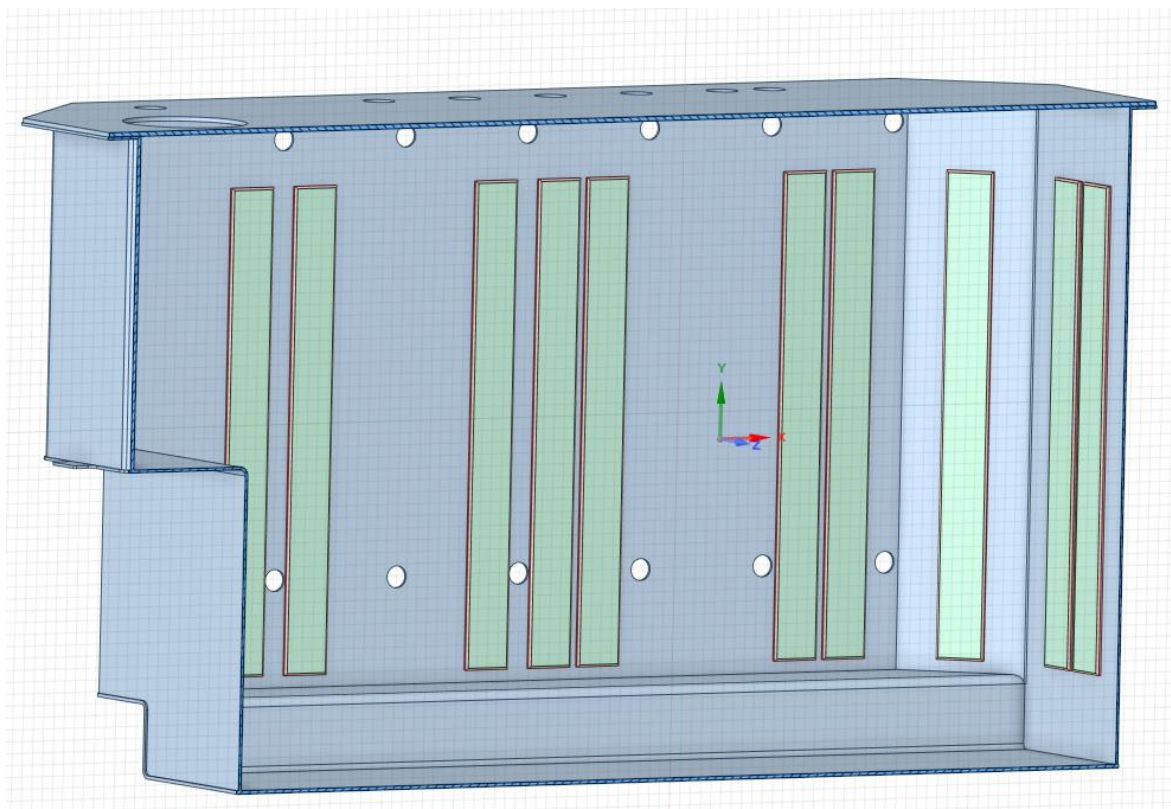
Příloha 2: Pohled z boku na model nádoby transformátoru 40 MVA ER33M-0



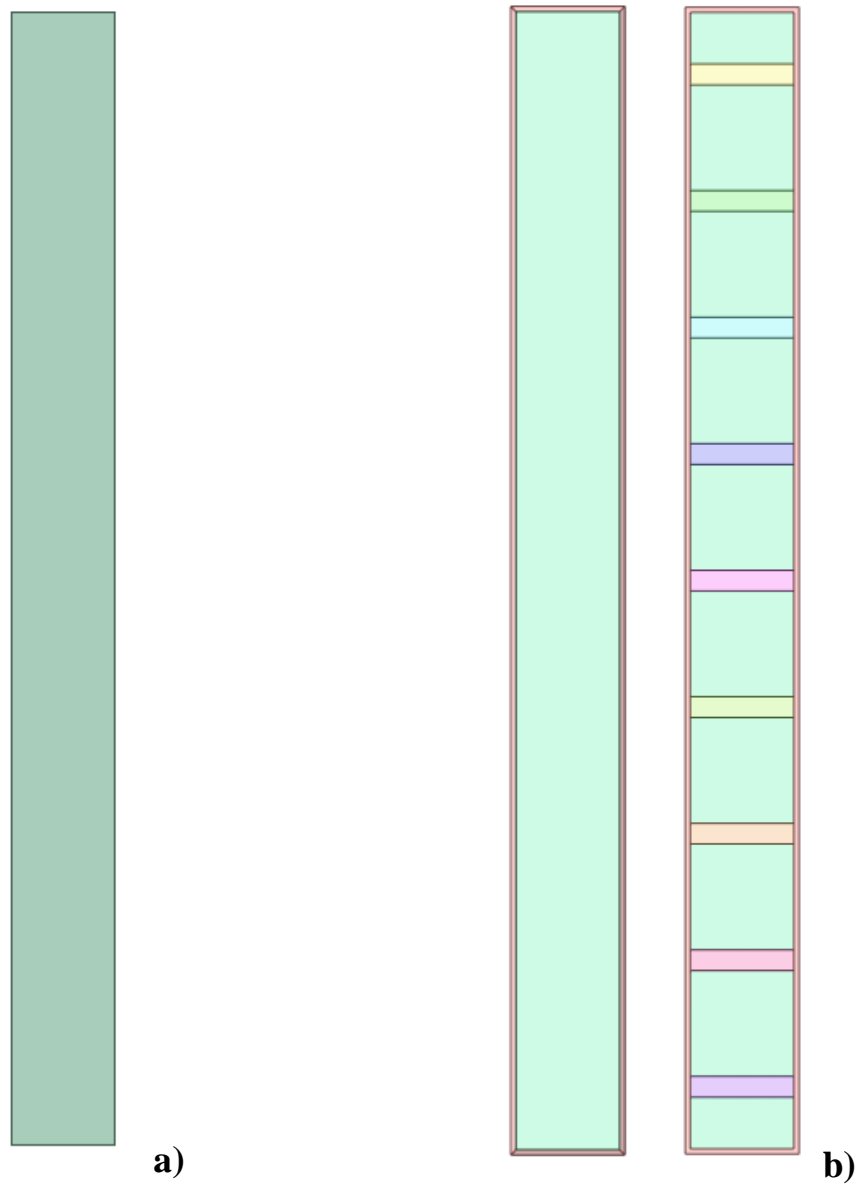
Příloha 3: Pohled shora na model nádoby transformátoru 40 MVA ER33M-0



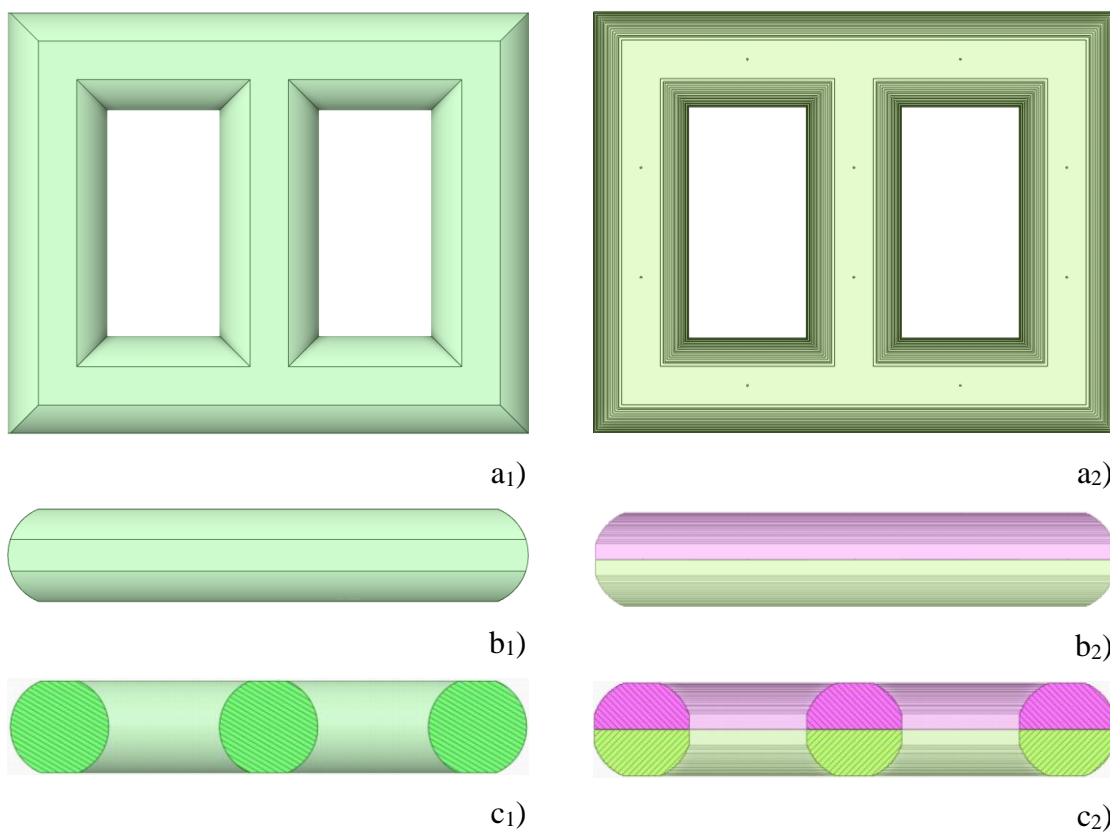
Příloha 4: Pohled do transformátoru s očíslovanými stínítky, jádry a stěnami



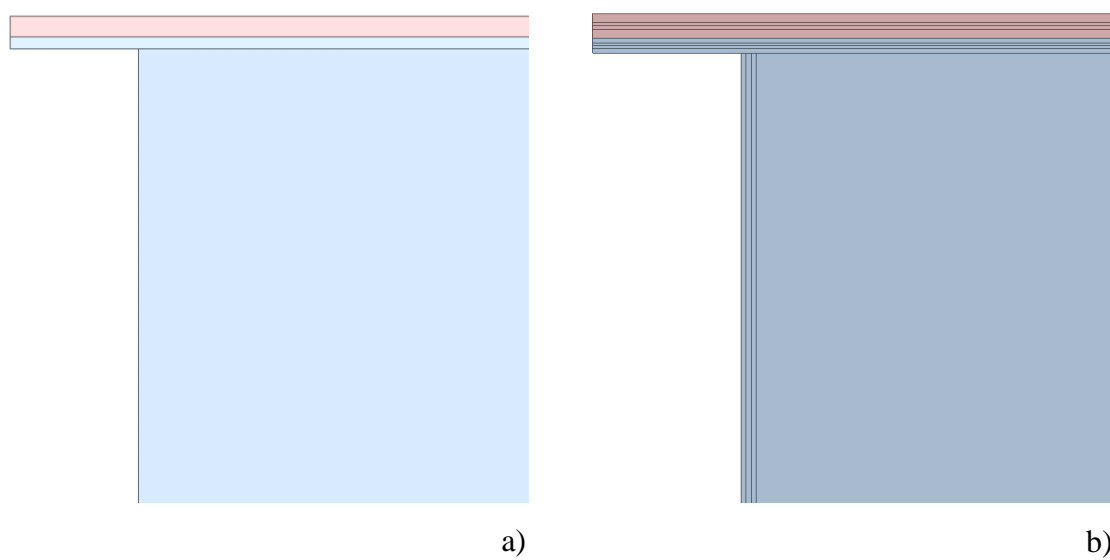
Příloha 5: Řez transformátorové nádoby s připevněnými stínítky



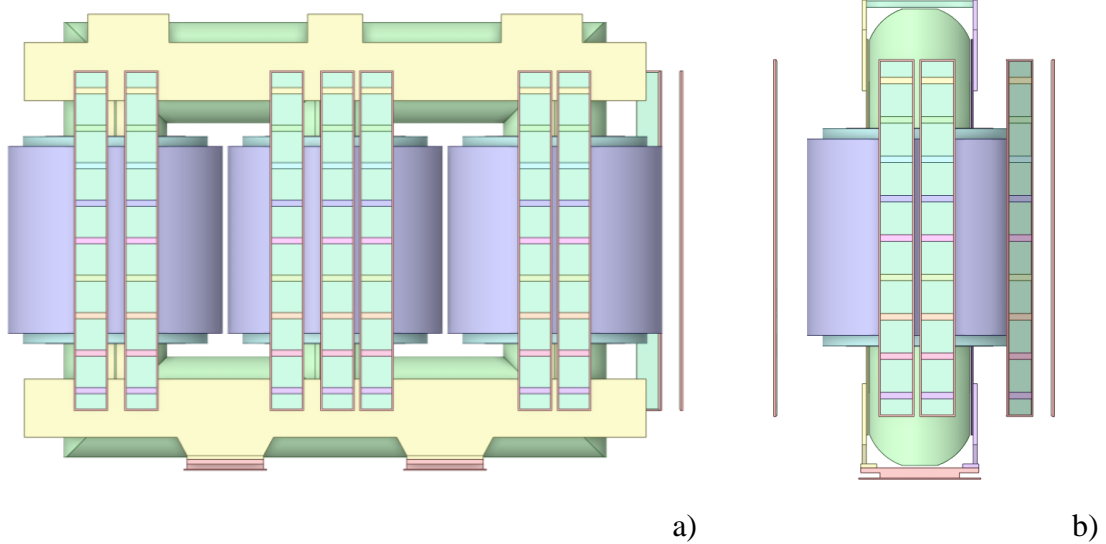
Příloha 6: Geometrie stínítka: a) zjednodušená, b) původní



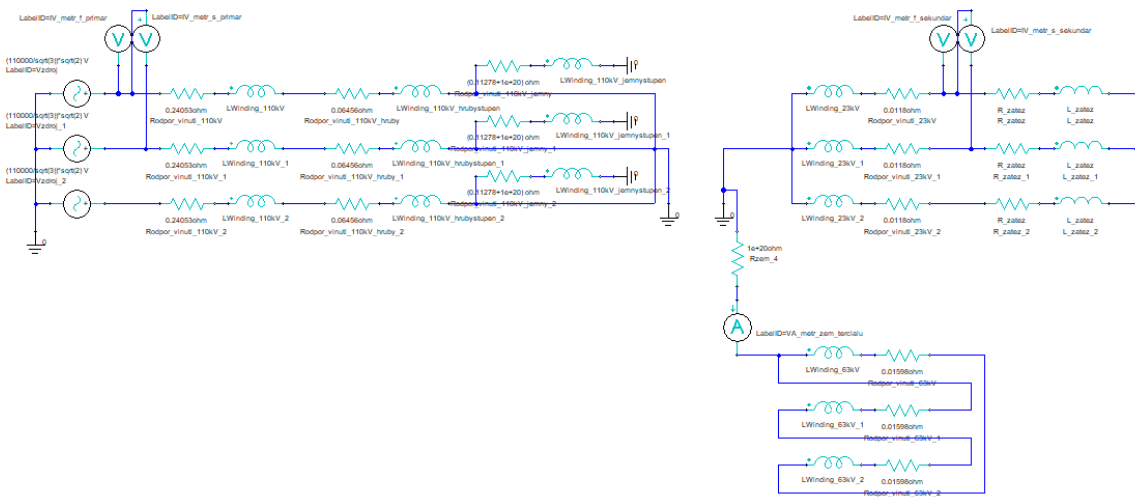
Příloha 7: Zjednodušená a původní geometrie magnetického obvodu: a) pohled zepředu b) shora c) shora v řezu uprostřed sloupků transformátoru



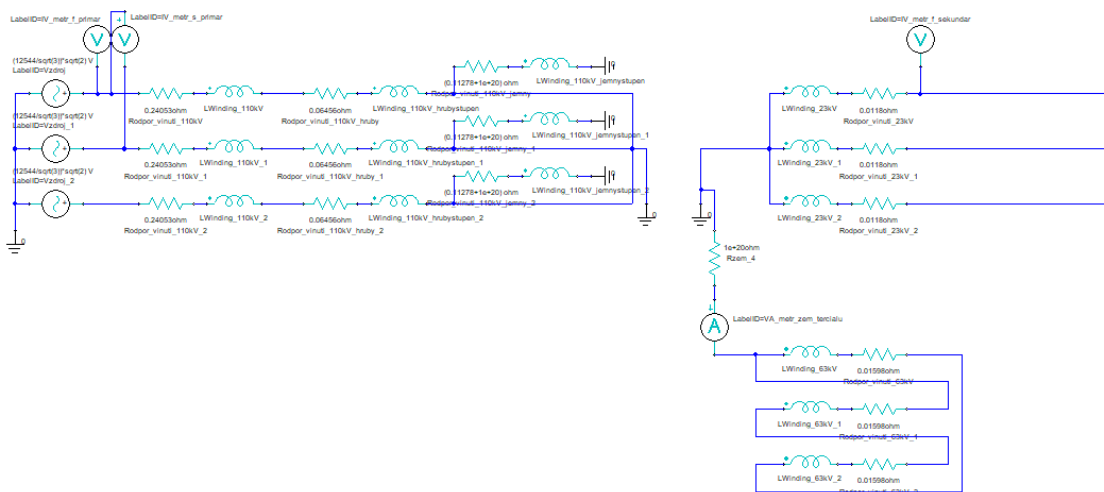
Příloha 8: Detail nádoby a víka: a) geometrie před rozřezáním, b) po rozřezání



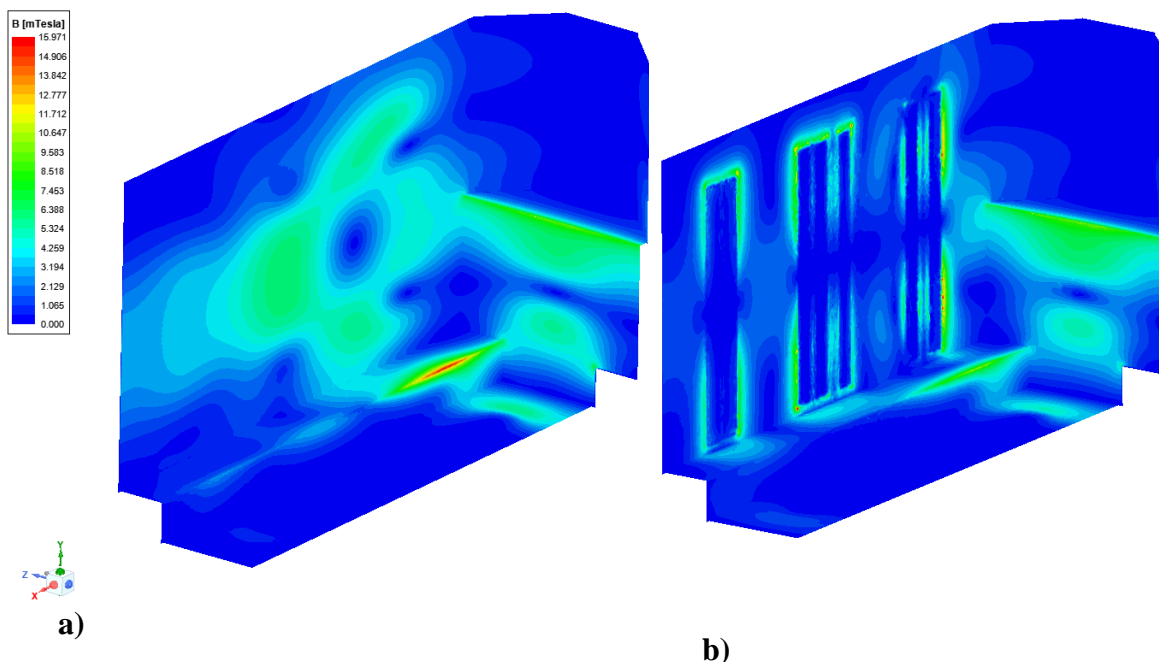
Příloha 9: Umístění stínítek vůči magnetickému obvodu a cívkám: a) pohled z čela, b) z boku



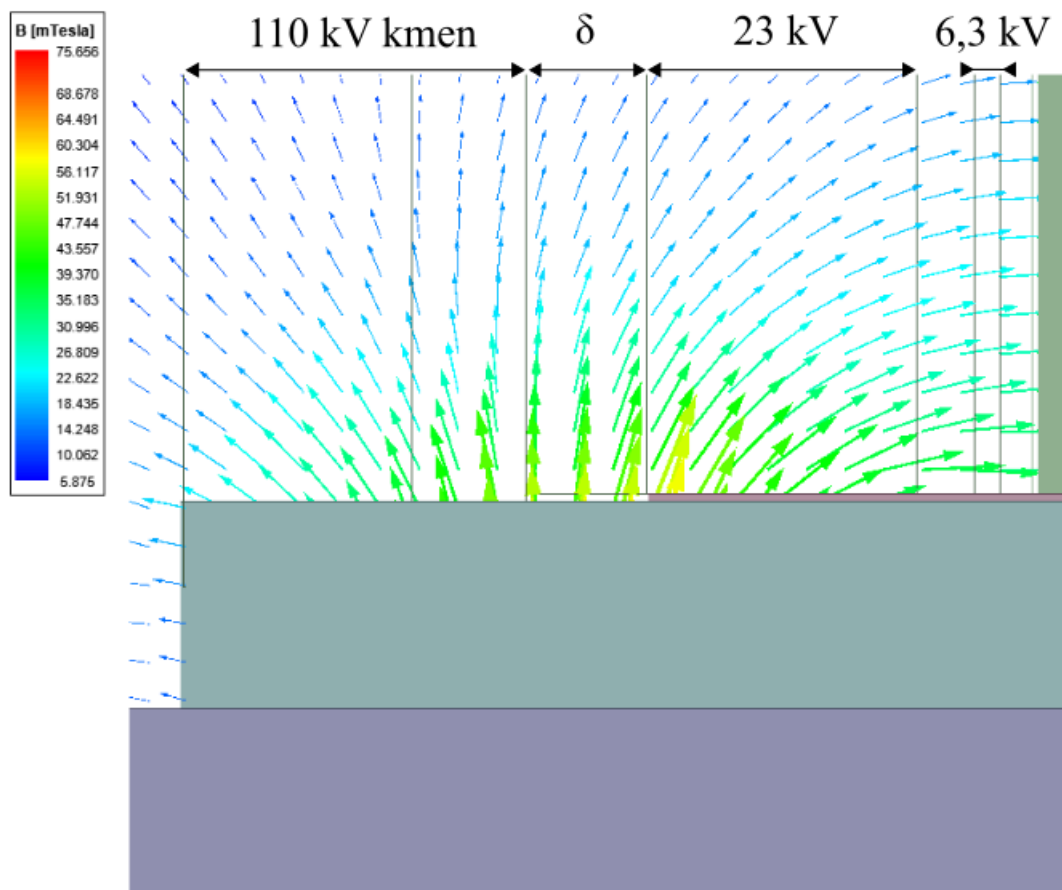
Příloha 10: Externí obvod pro jmenovité napájení transformátoru a jeho zatížení pomocí RL zátěže



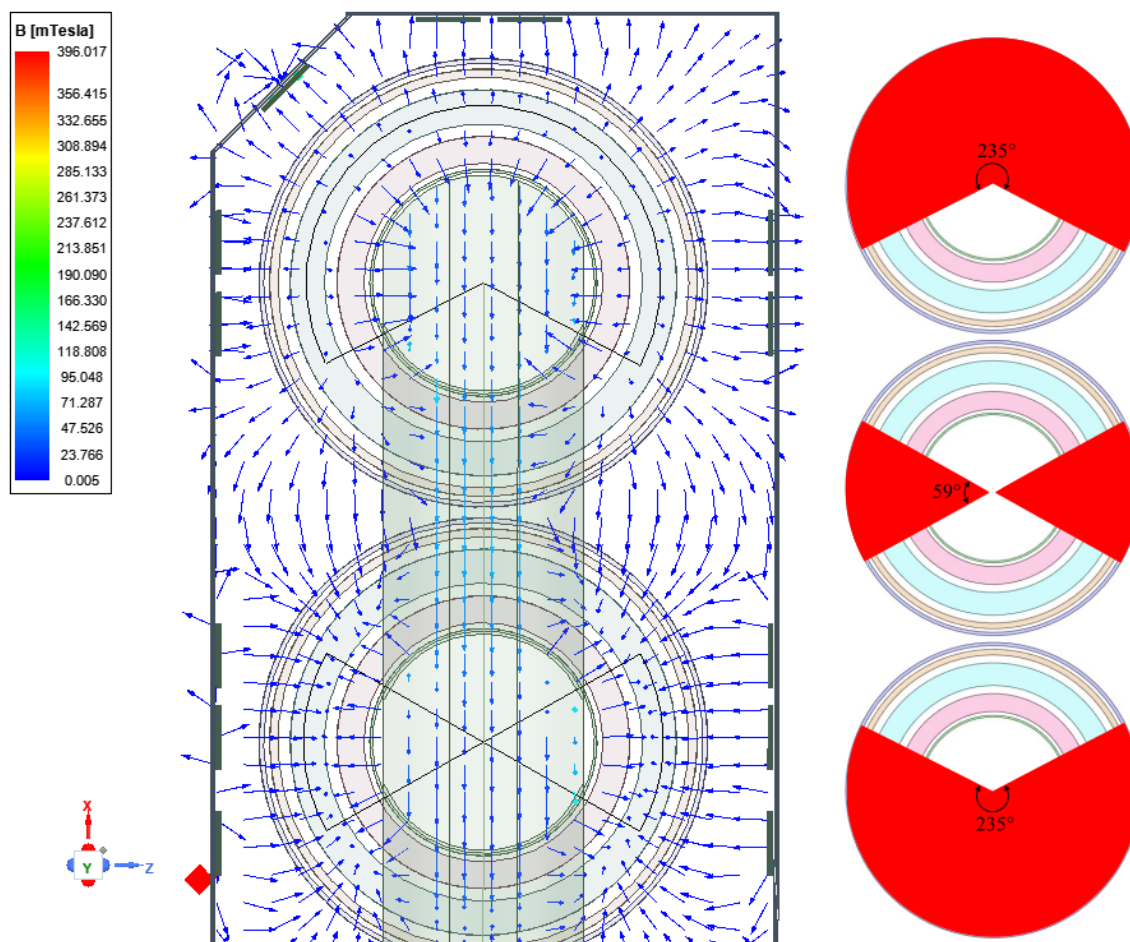
Příloha 11: Externí obvod transformátoru se zapojeným sekundárním vinutím nakrátko



Příloha 12: Pohled na vnitřní nejdelší stranu transformátorové nádoby, dno a jedinou stěnu bez stínítek: a) bez stínítek s RL zátěží, b) se stínítky s RL zátěží



Příloha 13: Vektory indukce v řezu uprostřed vinutí u transformátoru s vyzkratovaným sekundárním vinutím



Příloha 14: Rozložení vektorů indukce v řezu u transformátoru se stínítky s vyzkratovaným sekundárním vinutím (vlevo). Výseče primárního vinutí, budící rozptylový magnetický tok, který se bude uzavírat směrem od magnetického obvodu (vpravo)