



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

VÝPOČET ZTRÁT A OTEPLENÍ VÍKA OLEJOVÉHO TRANSFORMÁTORU V BLÍZKOSTI PRŮCHODEK

LOSS AND HEAT CALCULATION OF OIL TRANSFORMER TOP COVER NEAR BUSHINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Šimon Trombik

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Mrajca

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Šimon Trombik

ID: 240814

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet ztrát a oteplení víka olejového transformátoru v blízkosti průchodek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište stavbu nádoby, víka a zapojení průchodek olejového distribučního transformátoru.
2. Provedte literární rešerši problematiky ztrát ve víku olejového transformátoru.
3. Vytvořte 3D model víka a potřebných komponentů olejového transformátoru v softwaru využívající metodu konečných prvků (Ansys) a provedte simulaci ztrát ve víku způsobené průtokem proudu v průchodkách.
4. Rozšiřte simulaci o tepelnou analýzu a zjistěte oteplení víka v okolí průchodek.
5. Provedte analýzu ztrát a oteplení víka pro zadaný skutečný transformátor. Nejprve uvažujte víko z klasické oceli a následně nemagnetické nerezí. Výsledky porovnejte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] KULKARNI, S.V. a KHAPARDE, S.A. Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics. 2nd Edition. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2013. ISBN 978-1-4398-5418-1.
- [2] ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. a KANOGLU, Mehmet. Heat and mass transfer: fundamentals & applications. Fifth edition in SI units. New York: McGraw-Hill Education, 2015. ISBN 9789814595278.
- [3] JEZIERSKI, Eugenius. Transformátory: teoretické základy. Praha: Academia, 1973.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 29.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Mrajca

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá výpočtem ztrát na víku olejového transformátoru v blízkosti NN průchodek. Dochází zde totiž k tepelnému namáhání a stárnutí těsnění pod průchodkou a následně k úniku oleje. Je zde stručně popsána výroba dílčích částí olejového transformátoru a kapitola věnována transformátorovým průchodkám. Další součástí je také literární rešerše vířivých ztrát ve víku a nádobě olejového transformátoru. Následně je zde popsána příprava elektromagnetické a tepelné simulace, kdy zvláště tepla byla věnována velké pozornost.

KLÍČOVÁ SLOVA

vířivé proudy, transformátorová průchodka, hloubka vniku, víko, olejový transformátor

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the calculation of losses on the cover of an oil transformer in the vicinity of LV bushings. This is because there is thermal stress and aging of the seal under the grommet and, subsequently, oil leakage. The production of oil transformer sub-parts is briefly described here, and the chapter is devoted to transformer grommets. Another part is also a literature search of eddy losses in the cover and container of the oil transformer. Subsequently, the preparation of the electromagnetic and thermal simulation is described here, where a lot of attention was paid to heat in particular.

KEYWORDS

eddy current, transformer bushing, penetration depth, top cover, oil transformer

TROMBIK, Šimon. *Výpočet ztrát a oteplení víka olejového transformátoru v blízkosti průchodek*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160628>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Miroslav Mrajca.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Šimon Trombik
VUT ID autora: 240814
Typ práce: Semestrální práce
Akademický rok: 2022/23
Téma závěrečné práce: Výpočet ztrát a oteplení víka olejového transformátoru v blízkosti průchodek

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu, panu Ing. Miroslavu Mrajcovi, za odborné vedení, konzultace, trpělivost, cenné zkušenosti a podnětné návrhy k práci a jeho kolegovi, panu Ing. Jakobovi Súkeníkovi, za pomoc při tvorbě simulačních modelů a přípravě tepelných simulací. Dále bych chtěl poděkovat panu Bc. Martinu Machalovi za poskytnuté návrhy nutné k tvorbě 3D modelů dílčích částí transformátoru.

Obsah

Úvod	12
1 Stavba olejových distribučních transformátorů	13
1.1 Stavba aktivní části	13
1.1.1 Zapojování aktivní části	14
1.2 Stavba nádoby	15
1.3 Stavba víka	17
2 NN a VN průchodky	18
2.1 Způsob montáže	18
2.2 Materiály izolátorů	18
2.3 Těsnění na víku	19
3 Vznik vířivých ztrát	20
3.1 Vznik vířivých proudů	20
3.2 Odvození rovnice hloubky vniku	21
3.3 Hloubka vniku	25
3.4 Magnetizační křivka	28
3.5 Magnetické pole v okolí vodiče	31
4 Příprava simulace a výpočty	32
5 Elektromagnetická simulace	34
5.1 Simulace s víkem z konstrukční oceli S235JR	34
5.2 Simulace s víkem z nerezové oceli AISI 304	37
6 Úvod k tepelným výpočtům	39
6.1 Sdílení tepla kondukcí	39
6.2 Sdílení tepla konvekcí	39
6.3 Sdílení tepla radiací	39
6.4 Výpočet součinitelů přestupů tepla	40
6.4.1 Součinitel přestupu tepla těsnění průchodky	40
6.4.2 Součinitel přestupu tepla na kontaktech s olejem	41
6.4.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí vzduchu	41
6.4.4 Součinitel přestupu tepla konvekcí oleje v transformátoru	42
6.4.5 Součinitel přestupu tepla na kontaktech s podložkou	43

7	Tepelná simulace	44
7.1	Rezistivita proudovodné dráhy NN průchodky	44
7.2	Výpočet zdrojů vnitřního tepla	44
7.3	Tepelná analýza víka transformátoru s výřezem z oceli S235JR	45
7.4	Tepelná analýza víka transformátoru s výřezem z nerezové oceli AISI 304	49
	Závěr	51
	Literatura	53
	Seznam symbolů a zkratk	55

Seznam obrázků

1.1	Aktivní část transformátoru	13
1.2	Nádoba transformátoru	16
1.3	Víko transformátoru	17
2.1	Transformátorové průchodky	19
3.1	Vířivé proudy v plném jádru a v jádru složeném z izolovaných plechů	21
3.2	Hloubka vniku	25
3.3	Detail na zapojenou NN průchodku	26
3.4	Detail na zapojenou NN průchodku	27
3.5	Magnetizační křivka různých skupin látek	28
3.6	Magnetizační křivka feromagnetických látek	29
3.7	Magnetizační křivka oceli S235JR	30
3.8	Grafické znázornění magnetických indukčních čar v okolí vodiče . . .	31
4.1	Kompletní konstrukční model víka distribučního transformátoru 400 kVA	32
4.2	Kompletní konstrukční model NN průchodky 1 kV/630 A	32
5.1	Zjednodušený model pro 3D elektromagnetickou simulaci	34
5.2	Výsledný zjednodušený model pro 3D elektromagnetickou simulaci . .	35
5.3	Okrajové podmínky pro elektromagnetickou simulaci	35
5.4	Propojení projektu skrze platformu Workbench Ansys	36
5.5	Výsledek 3D simulace vířivých ztrát ve víku z oceli S235JR z horního nebo dolního pohledu	37
5.6	Zrcadlený výsledek 3D simulace vířivých ztrát v řezu ve víku z oceli S235JR	37
5.7	Výsledek 2D simulace vzniku vířivých ztrát ve víku s nekonečnou tloušťkou z oceli S235JR	38
5.8	Výsledek 3D simulace vířivých ztrát ve víku z nerezové oceli AISI 304	38
6.1	Součinitele přestupu tepla a stykového odporu v těsnění	40
6.2	Součinitele přestupů tepla a stykového odporu	43
7.1	Propojení projektu skrze platformu Workbench Ansys	45
7.2	Zjednodušený model NN průchodky	46
7.3	Zjednodušený model víka s průchodkami	46
7.4	Detailní pohled na simulační mřížku tepelného modelu	47
7.5	Horní pohled na oteplení víka při zátěži s výřezem z oceli S235JR . .	48
7.6	Dolní pohled na oteplení víka při zátěži s výřezem z oceli S235JR . .	48
7.7	Horní pohled na oteplení víka při zátěži s výřezem z nerezové oceli AISI 304	49

7.8 Dolní pohled na oteplení víka při zátěži s výřezem z nerezové oceli AISI 304	50
---	----

Seznam tabulek

3.1	Tabulka materiálů a vypočtené hloubky vniku	26
3.2	Tabulka rozměrů zapojené NN průchodky z Obr. 3.4	27
3.3	Tabulka jednotlivých bodů magnetizační křivky z Obr. 3.7	30

Úvod

Transformátory jsou nejčastěji děleny na suché a plněné olejem, přičemž tepelné ztráty jsou si velice podobné u obou druhů. Ztráty v těchto elektrických strojích se vyskytují především ve formě nechtěného tepla. Tyto ztráty způsobují vysoké proudy tekoucí ve vodičích a vinutích, tzv. ztráty nakrátko, dále ztráty naprázdno, způsobené vířivými proudy a hysterezní ztráty v jádru transformátoru. Dalším místem, kde nám ztráty vířivými proudy kromě jádra a vinutí způsobují nemalé problémy u olejových transformátorů, je horní víko transformátoru v blízkosti nízkonapěťových průchodek. Tyto porcelánové nebo epoxidové průchodky zajišťují hermetické oddělení venkovního prostředí od transformátorového oleje v nádobě a také zabezpečují izolované vyvedení jak nízkonapěťových (NN), tak i vysokonapěťových (VN) vývodů vinutí.

A právě v blízkosti nízkonapěťových průchodek můžeme registrovat vysoké zahřívání víka průchodem velkých proudů, které jsou mnohonásobně větší než u vysokonapěťových vývodů. A právě tyto velké proudy způsobují velké ztráty vířivými proudy ve víku, které se projevují nadměrným zahříváním víka v blízkosti průchodek. Takto velké nežádoucí oteplení víka vede k tepelnému namáhání a stárnutí těsnění na průchodkách, a tedy ztráty těsnosti v místech styku víka a nízkonapěťových průchodek. Pakliže dojde k úniku oleje, transformátor se musí odstavit a nechat opravit, neboť olej jednak zajišťuje chlazení jádra a vinutí, dále zajišťuje i jakousi izolační bariéru mezi živými částmi v transformátoru a navíc je transformátorový olej, jako každý ropný produkt, hořlavý. Tento druh závad je poněkud častý, jak potvrzují zaměstnanci firmy Elpro-Energo Transformers s.r.o., zabývající se výrobou olejových transformátorů, kde závady tohoto charakteru patří mezi nejčastější servisní a reklamační požadavky zákazníků.

Pro snížení těchto ztrát se proto oblast kolem těchto průchodek nahrazuje materiálem, způsobujícím menší vířivé ztráty, jako je například nerezová ocel. Tím se ovšem zvyšuje samotná cena víka, neboť tato ocel je přibližně třikrát dražší než běžná konstrukční ocel. Dále se musejí připočítat náklady na vypálení původního materiálu v oblasti kolem NN průchodek, navaření nerezové oceli na víko, opracování a další náklady, které tuto operaci ještě prodražují. Víko s touto úpravou také vyžaduje delší čas na výrobu, což způsobuje nižší produkci těchto upravených vík. Tato práce se bude zaměřovat na možná řešení tohoto problému z pohledu technologického a ekonomického. V dalších kapitolách je vysvětleno, proč průchodky vůbec používáme a také jak vznikají tepelné ztráty ve víku způsobené vířivými proudy.

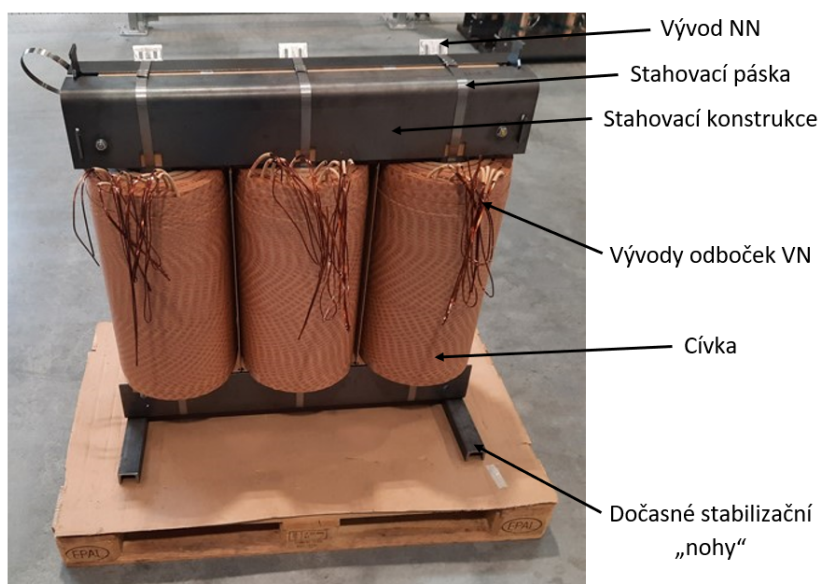
1 Stavba olejových distribučních transformátorů

Olejový distribuční transformátor se skládá ze tří základních částí, kterými jsou aktivní část transformátoru, nádoba a víko. Informace jsou čerpány především ze zdroje [1].

1.1 Stavba aktivní části

Nejvíce složitá část na výrobu je samozřejmě aktivní část, neboť právě zde se transformuje elektrická energie na různé napěťové hladiny. Aktivní část se skládá z jádra, primárního a sekundárního vinutí.

Vše začíná u vysekání jednotlivých vrstev jádra z ocelových plechů obohacených o křemík nejčastěji o síle 0,23 mm. Tyto plechy jsou dále vysokoteplotně žíhané a oboustranně je nanášena tenká fosfátová vrstva tvořící dostatečnou izolační vrstvu. Po vysekání jednotlivých plechů se složí transformátorové jádro do tvaru písmene E. Nejčastěji se transformátorové plechy překládají metodou Step-Lap, kdy se jednotlivé plechy přes sebe překládají v kaskádovitém a nejčastěji zdvojeném uspořádání, aby se co nejvíce zmenšily přídatné ztráty v jádře. Jádro složené z ocelových plechů se stabilizuje ocelovou stahovací konstrukcí pomocí pásek a závitových tyčí. Dále se jádro napodobující tvar písmene E stabilizuje proti převrácení pomocí „noh“, jak lze vidět na Obr. 1.1, které se před vložením aktivní části do nádoby odstraňují.



Obr. 1.1: Aktivní část transformátoru

Dalšími nezbytnými částmi jsou cívky, které se v dnešní době navíjejí z mědi nebo hliníku [2]. Měděný vodič má vyšší pevnost v tahu než hliníkový drát a cívky navinuté z mědi mají výhodu menších rozměrů oproti hliníkovým na úkor vyšší hmotnosti a ceny. Cívky navinuté z hliníku, které jsou jednodušší na ohýbání a tvarování, jsou lehčí a snižují cenu transformátoru na polovinu, se jeví u distribučních transformátorů jako jasný vítěz [3]. Ovšem někteří zákazníci preferují vinutí měděná, což není pro výrobce žádný problém, neboť technologie a proces výroby je stále stejný.

Vše začíná u navinutí nízkonapětového vinutí. Ty se navíjejí u distribučních transformátorů nejčastěji ve formě fólie, přičemž jednotlivé závity se oddělují izolačním papírem. Na začátek a konec fóliového vinutí se obroušením a přilisováním přichytí dva vývody ve formě ploché válcované tyče. Dále se vkládají chladicí kanálky zajišťující chlazení průtokem oleje, které mají rovněž funkci izolační bariéry mezi NN a VN vinutími.

Poté navazuje navíjení vysokonapětového vinutí. To se nejčastěji navíjí v podobě tenkého kruhového vodiče se smaltovaným povrchem. Ten se obvykle navíjí po vrstvách ze strany na stranu. Na obou koncích cívky se zároveň s drátem navíjí bariéry z izolačního papíru zajišťující lepší koordinaci při navíjení VN drátu a také izolují cívky od nádoby nebo sousedních cívek. Izolační papír se navíjí i mezi každou vrstvu vinutí, a to progresivní mezipolohovou metodou. Tato metoda zaručuje silnou vrstvu izolace v místech největšího napětového potenciálu mezi začátkem a koncem navinutých vrstev a zároveň šetří izolační papír na místech, kde je minimální napětový potenciál. To znamená, že po navinutí první vrstvy vinutí a změně směru navíjení se izolační papír začíná navíjet v tenké vrstvě a s dalšími závity vodivého drátu roste i tloušťka izolace pod vinutím. Na VN vinutí se nejčastěji ještě vyvádí pět napětových odboček, které umožňují měnit $\pm 2 * 2,5 \%$ úroveň nominálního vstupního napětí transformátoru nebo sedm vývodů s možností měnit až $\pm 3 * 2,5 \%$ úroveň nominálního vstupního napětí transformátoru. Všechny navinuté cívky se nakonec ještě vytvrzují v pecích z důvodu zvýšení pevnosti.

Nakonec se nasazují cívky na sloupky jádra a magnetický obvod je uzavřen po založení horního jha a stažen stahovací konstrukcí a ocelovými pásky nebo závitovými tyčemi [4].

1.1.1 Zapořádání aktivní části

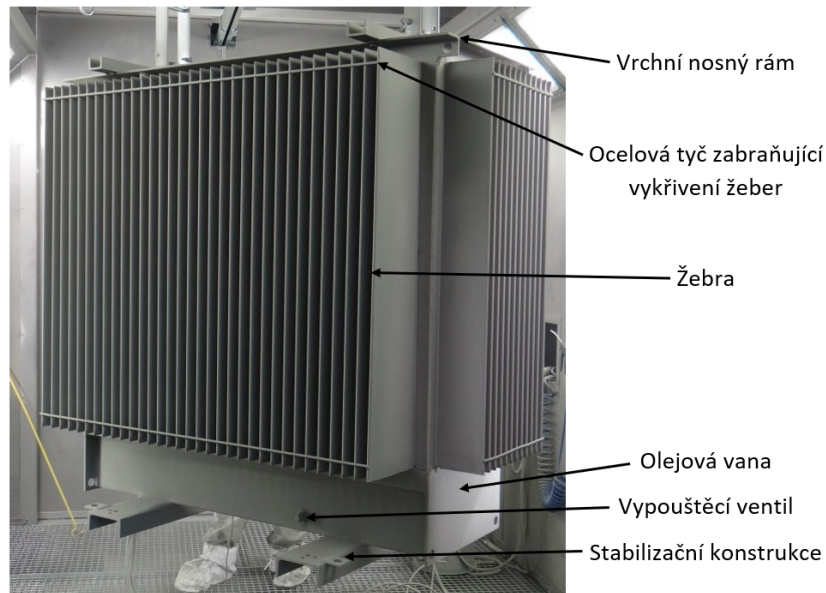
Tato operace na transformátoru se provádí převážně manuálně. Při zapojování aktivní části je potřeba zapojit a zároveň i zaizolovat veškeré vodiče a vývody z cívek. Běžný distribuční transformátor má dva NN vývody ve formě plochých válcovaných tyčí a kolem sedmi a více VN vývodů z tenkého kruhového vodiče.

NN vývody tečou mnohem větší proudy než na VN vývodech, tudíž spojení NN vývodů s vodiči v NN průchodkách se nejčastěji provádí pomocí navrženého počtu měděných plochých pásků nebo měděných splétaných lan, ale typ vodiče si vybírá zákazník. Lana se nastřihají na požadovanou délku a na její konce se přiliskují kabelová oka, kdežto do měděných pásků požadované délky se vylišují díry pro přichycení k vývodu z cívky a k vodiči v průchodce. Lana jsou ještě zaizolovány do izolačního papíru a oba druhy vodičů se přichycují stejně pomocí pneumatické pistole nýtováním. Toto se provede u všech koncových vývodů (vývodů vzdálenějších od sloupků) z NN cívek při dodržení zapojení hodinového úhlu transformátoru. Zbylé tři počáteční vývody (vývody blíže k sloupkům) z NN cívek se spojují k sobě, aby vytvořili společný střed, jak je zvykem u distribučního transformátoru s vyvedeným uzlem (zapojení do Y). Tento propoj je zajištěn buď stejným typem ploché válcované tyče jako vývody z NN cívky nebo při velkých rozměrech tyče měděnými pásky a je přiliskován stejným způsobem.

VN vývody z cívky se spolu s vodiči ve VN průchodkách propojují pomocí kulatých měděných drátů, kdy se podle velikosti proudu a průměru děr v přepínači odboček navrhne jejich průřez. Tyto měděné propoje se poté spojí s vývodem z cívky a vodičem v průchodce pomocí lisovací spojky a v případě měděného vývodu pomocí pájení. Zapojování VN strany bývá mnohem komplikovanější z důvodu zvýšeného počtu vodičů, z nutnosti zapojení vývodů do přepínače odboček a ze spoje tvořící hodinový úhel transformátoru. VN propoje se izolují do více vrstev izolačního papíru a je důrazněji dodržována rozteč mezi jednotlivými propoji. Nakonec jsou propoje pomocí stahovacích pásků připevněny na dřevěnou tyč, která zajišťuje rozteč mezi propoji. Zapojení VN strany se vždy ještě testuje na správné zapojení hodinového úhlu transformátoru a měří se přechodné odpory určující, zda byly všechny propoje kvalitní a dostatečně vodivé.

1.2 Stavba nádoby

Nádoba už není tak náročná na výrobu, přesto jsou stroje vyrábějící nádoby dražší než stroje vyrábějící aktivní části. Nádoba se skládá ze tří jednotlivých částí, a tedy ze spodní olejové vany, trupu a vrchního nosného rámu zobrazených na Obr. 1.2. Spodní olejová vana je nízká ocelová nádoba s výpustí pro počáteční plnění a servisní vypouštění transformátorového oleje. Musí se vyrábět z dostatečně silného ocelového plechu, neboť drží celou konstrukci nádoby pohromadě a musí taktéž vydržet tíhu celého transformátoru. Na dno nádoby se poté typicky navařují ocelové profily zajišťující stabilitu transformátoru.



Obr. 1.2: Nádoba transformátoru

Následuje trup, který je tvořen harmonikou z jednotlivých chladicích žebra. Harmonika se ohýbá na plně automatizovaném stroji a na jednotlivé rohy žebra se robotem navaří ocelové tyče zabraňující ohnutí žebra. Nejčastěji se vyrábí z 1 až 1,5 mm tlustého ocelového plechu. Rozteč mezi jednotlivými žebry obvykle bývá 45 až 90 mm. Tato žebra zajišťují dvě důležité funkce. Zajišťují lepší tepelnou výměnu mezi okolním prostředím a olejem díky zvětšení chladicí plochy trupu transformátoru. Dále také zajišťují objemovou kompenzaci nádoby uplatněnou při změně objemu oleje způsobené růstem nebo snížením jeho teploty. Toto moderní řešení odstraňuje nutnost používat konzervátor sloužící k vyrovnávání objemu oleje v transformátoru, který často vykazoval poruchy. Tímto odstraněním konzervátoru dosáhne transformátor vyšší spolehlivosti provozu bez poruch.

Poslední částí nádoby je vrchní nosný rám. Vrchní nosný rám dodává trupu nádoby dostatečnou pevnost a společně s pryžovým těsněním zajišťují těsnost víka k nádobě transformátoru, aby nedocházelo k únikům transformátorového oleje. Typicky se vyrábí z oceli stejné tloušťky jako spodní olejová vana a pro uchycení víka a vrchního nosného rámu se zde nacházejí díry pro šroubové spoje. Rám se poté manuálně navaří k trupu nádoby a následně se nádoba testuje na těsnost. U nádob se provádí fluorescenční kapilární zkouška nepropustnosti svárů zajišťující 100 % olejotěsnost [4]. Dále se nádoba opískuje a nanáší se antikorozní ochrana. Antikorozní ochranu představují dvě vrstvy základní barvy a dvě vrstvy krycích nátěrů o celkové tloušťce 140 mikrometrů. Standardní barevný odstín je RAL 7033 vykazující ideální tepelné vyzařovací vlastnosti pro distribuční transformátory.

1.3 Stavba víka

Poslední částí transformátoru je horní víko. To už není tak komplikované na výrobu jako ostatní části, neboť se ve skutečnosti jedná o výpalek z oceli, nicméně zaujímá velice důležitou část při stavbě a funkčnosti transformátoru. Vyrábí se ze silného ocelového plátu zaručujícího dostatečnou pevnost, neboť se na víku nachází navařená nosná oka umožňující zvedání celého transformátoru při jeho transportu. Po obvodu víka se nacházejí díry pro připevnění k vrchnímu nosnému rámu pomocí šroubových spojů.

Dále se do víka vytvářejí díry pro NN a VN průchodky. Mimo děr různých průměrů se na víku nachází přepínač odboček, nalévací hrdlo, množství jímek pro připevnění různých měřících čidel, senzorů a ochran jako je např. DMCR. Ty mohou měřit a sledovat teplotu, tlak, vývoj plynů nebo třeba hladinu oleje v transformátoru.

V okolí NN průchodek se, jak už zaznělo v úvodu práce, vypaluje původní ocel a nahrazuje nemagnetickou nerezovou ocelí, jak lze vidět na Obr. 1.3. Tato operace se provádí pouze u víka transformátoru s NN průchodkami, kterými prochází velký proud způsobující nadměrné zahřívání víka v blízkosti průchodky. Horní víko má totožnou antikorozi ochranu jakou má celá nádoba transformátoru. K víku se při montáži přichytí kompletní aktivní část transformátoru. Aktivní část se tedy zavěsí na víko a po vložení do nádoby leží pouze na pryžových šňůrách na dně spodní olejové vany.



Obr. 1.3: Víko transformátoru

2 NN a VN průchodky

Mezi nejdůležitější příslušenství připevněná na víku jsou samostatné NN a VN průchodky. Nejčastěji se jedná o umělohmotné, porcelánové nebo epoxidové izolátory s vodivou dráhou uprostřed pro vyvedení vodičů z navinutých cívek vysokého nebo nízkého napětí.

VN průchodka je konstruována především pro dostatečné odizolování vysokonapěťového vývodu z transformátoru od kovových předmětů v jejím okolí. Typicky tyto průchodky u distribučních transformátorů jsou schopné vést proud až 250 A a izolační vlastnosti až do 35 kV.

NN průchodky se konstruují primárně pro schopnost vést velké proudy tekoucí z transformátoru na straně nízkého napětí. Ty musí vydržet proudy až do 6 kA. Napěťová odolnost bývá okolo 1,2 kV. Průchodky se vyrábějí i pro mnohem větší proudy a napětí, ale u distribučních transformátorů jsou tyto hodnoty dostačující.

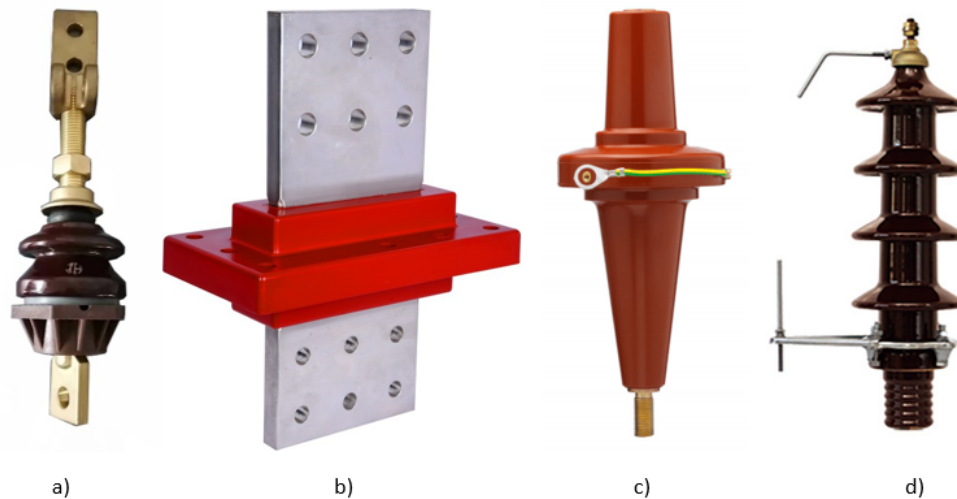
2.1 Způsob montáže

Konstrukčně vyšší průchodky, jako například porcelánové VN průchodky, nebo veškeré epoxidové a umělohmotné průchodky se nejčastěji upevňují pomocí přídržného plechového prstence, čtyř matic a čtyř svorníků navařených na víku kolem díry pro průchodku. Svorníky jsou ve skutečnosti krátké závitové tyče, které se pomocí svařovací pistole mohou navařit na libovolný kovový povrch. Další způsob montáže se používá u průchodek, jejichž vodivá dráha má závity po svém obvodu a připomíná tím šroub. Ten se montuje zespodu víka spolu s těsněním a umělohmotnou podložkou. Na tento šroub se poté nasazuje další těsnění, porcelánový izolátor, zajišťovací matice a praporec na připevnění kabelového nebo přípojnicového vedení. Tato montáž se taktéž používá u NN porcelánových průchodek, jak lze vidět na Obr. 2.1 a).

2.2 Materiály izolátorů

Nejvíce používaným materiálem pro výrobu izolátorových částí průchodek je porcelán. Ty lze jednoduše rozpoznat svými nezaměnitelnými stříškami, znemožňující plazivým proudům povrchového průrazu a hnědou lesklou glazurou na svém povrchu. Porcelánové VN průchodky se mnohdy navíc vybavují bleskosvodem, který lze vidět na Obr. 2.1 d). Ten zabraňuje povrchovému průrazu průchodky při úderu blesku odvedením oblouku přes bleskosvodné tyče. Sice dojde k opálení bleskosvodů, ale průchodka se tak uchrání před zničením.

Mezi další druhy používaných materiálů patří umělá hmota a epoxidová pryskyřice. Konektorovou VN průchodku je možno vidět na Obr. 2.1 c). Na tento druh průchodek se přírodní vodič vybavuje konektorem, který stačí jen zacvaknout, zajistit proti odpojení a zaizolovat. NN epoxidové pásovinové průchodky se začínají více používat [5] z důvodu jejich nenáročné výroby a tedy i nízké ceny, jednoduchosti montáže a odolnosti proti zničení nebo poškození. Skládá se z vodivé pásovin s dírami zalité v epoxidové pryskyřici znázorněnou na Obr. 2.1 b).



Obr. 2.1: Transformátorové průchodky

2.3 Těsnění na víku

Mezi průchodkami a horním víkem transformátoru se umísťuje pryžové těsnění zabráňující úniku oleje. Tyto těsnění pro průchodky se dodávají spolu se samotnou průchodkou v jednom balení. Těsnění se musí také vkládat pod veškeré čidla a senzory ukotvenými na víku. Kulaté pryžové těsnící lano se vkládá mezi samotným víkem a horním nosným rámem nádoby. To se stříhá na míru až při skládání transformátoru. Těsnící lano se lepí vteřinovým lepidlem přímo na rám a oba konce jsou nakonec k sobě taktéž přilepeny. Lze taky použít gumokorek, ale ten se složitěji připravuje, a proto se tak často nepoužívá. Proto je nesmírně důležité dodržovat při montáži utahovací momenty zaručující dostatečnou přítlačnou sílu průchodek, senzorů a čidel, ale i samotného víka na těsnění.

Při vysokých teplotách pryžové těsnění ztvrdne a časem může dojít k jejímu prasknutí a k úniku transformátorového oleje [6]. Tato situace nastává při přehřívání víka vířivými proudy v místě, kde se nachází těsnění pod NN průchodkami. Poté musí dojít k odstavení transformátoru, neboť není schopen bezpečného provozu.

3 Vznik vířivých ztrát

Ztráty hrají velice klíčovou roli při návrhu transformátoru a jsou nedílnou součástí při jeho provozu. Pro konstruktéry jsou velmi důležité zejména ohmické ztráty ve vinutí, které stojí za tepelným namáháním aktivní části transformátoru, ztráty magnetizační, potřebné ke přemagnetování magnetického obvodu jádra a ztráty vířivými proudy, tvořícími se ve všech kovových částech transformátoru. A právě ztráty vířivými proudy způsobují zahřívání ocelového víka transformátoru v okolí NN průchodek po průchodu střídavého elektrického proudu z důvodu magnetického rozptylového pole.

Nejdříve musíme začít u základních principů elektrotechniky pro pochopení, jak a kde tyto ztráty vznikají.

Mezi základní rovnice v elektrotechnice se řadí Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru, které jsou vyjádřeny takto (tučné písmena značí vektorové veličiny):

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad (3.4)$$

kde \mathbf{E} je intenzita elektrického pole, \mathbf{B} je magnetická indukce, \mathbf{H} je intenzita magnetického pole, \mathbf{J} je proudová hustota, \mathbf{D} je elektrická indukce a ρ je objemová hustota volných nábojů.

Dále lze na tyto Maxwellovy rovnice navázat těmito materiálovými rovnicemi vyjádřenými těmito vztahy:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (3.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (3.6)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \quad (3.7)$$

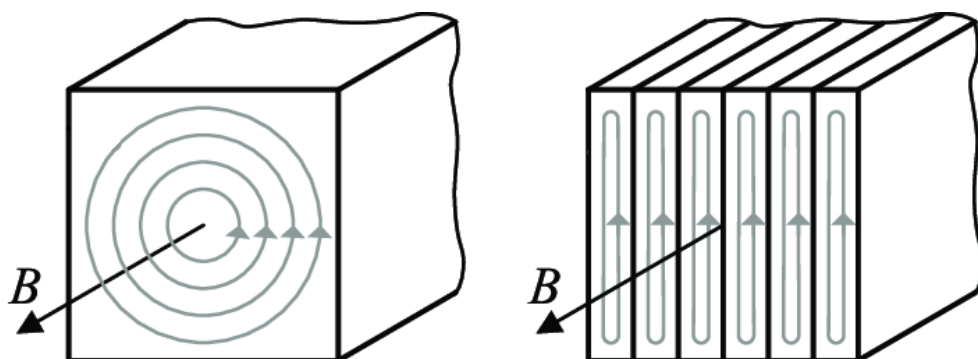
kde σ je vodivost, μ je permeabilita materiálu a ϵ je permitivita materiálu.

3.1 Vznik vířivých proudů

Z Faradayova indukčního zákona (3.1) vyplývá, že při změně toku magnetické indukce ϕ_B vzniká v materiálu elektromotorické napětí U_m přímo úměrné této změně [7]:

$$U_m = - \frac{d\phi_B}{dt}, \quad (3.8)$$

Z rovnice (3.8) plyne, že indukované elektromotorické napětí U_M je vůči změně magnetického toku ϕ_B záporné a proud, který jeho vlivem vzniká v materiálu, vytváří magnetické pole působící proti této změně. Tyto indukované proudy se nazývají vířivé a mají charakter proudových smyček vznikajících převážně v plošných a objemových vodičích nebo materiálech. Vířivé proudy se snaží zabránit rychlé změně magnetické indukce a proto jsou velice závislé na frekvenci magnetování nejčastěji feromagnetického jádra v elektrických strojích. Snižování ztrát způsobených vířivými proudy se v praxi provádí použitím materiálu s vysokým elektrickým odporem (legované oceli s malým množstvím křemíku) nebo rozdělením jádra navzájem izolovanými plechy, jež se skládají tak, aby byly orientovány rovnoběžně se směrem magnetického toku \mathbf{B} , jak lze vidět na Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Vířivé proudy v plném jádru a v jádru složeném z izolovaných plechů

3.2 Odvození rovnice hloubky vniku

Pro rovnici (3.2) platí podle [8], že poměr hustoty posuvného proudu $\partial \mathbf{D} / \partial t$ vůči proudové hustotě \mathbf{J} je daný poměrem $\sigma / (j\omega\epsilon)$, který je velmi vysoký i pro špatně vodivé kovy (kde ω je úhlová frekvence). Pokud se bude tato rovnice aplikovat pro nízké frekvence, jako je frekvence distribuční sítě 50 Hz v Evropě a 60 Hz ve Spojených státech amerických a Japonsku, tak vliv posuvné proudové hustoty je zanedbatelný pro analýzu vzniku vířivých proudů ve vodivých částech transformátoru, ve kterém se nachází velmi vodivé kovy jako je měď, hliník nebo ocel. Proto tuto rovnici lze zjednodušit do tvaru:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}. \quad (3.9)$$

Zákon zachování elektrického náboje lze vyjádřit pomocí rovnice kontinuity proudu v diferenciálním tvaru:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = - \frac{\partial \rho}{\partial t}. \quad (3.10)$$

Při analýze vzniku vířivých proudů ve vodivém materiálu lze zanedbat vliv posuvných proudů z důvodu pomalu měnícího se pole. Poté lze rovnici (3.10) zjednodušit do tvaru:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0. \quad (3.11)$$

Diferenciální rovnici prvního řádu (3.2) lze doplnit rovnicí (3.5) a obě strany rovnice poté rozšíříme operátorem rotace ve vektorovém součinu:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{H} = \nabla \times \sigma \mathbf{E}. \quad (3.12)$$

Při konstantní hodnotě vodivosti σ lze rovnici zjednodušit pomocí vektorové algebry do tvaru:

$$\nabla(\nabla \cdot \mathbf{H}) - \nabla^2 \mathbf{H} = \sigma \nabla \times \mathbf{E}. \quad (3.13)$$

Dále použitím rovnice (3.3) spolu s rovnicí (3.6), přičemž μ je považováno za konstantní, obdržíme tento vztah:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \nabla \cdot \mu \mathbf{H} = \mu \nabla \cdot \mathbf{H} = 0, \quad (3.14)$$

který lze zjednodušit na vztah:

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0. \quad (3.15)$$

Použitím vzorců (3.1) a (3.15) lze rovnici (3.13) zjednodušit do tvaru:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \sigma \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (3.16)$$

který lze upravit pomocí vzorce (3.6) do této podoby:

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0. \quad (3.17)$$

Nyní z hlediska frekvenční oblasti lze Faradayův zákon (3.1) vyjádřit následovně:

$$\nabla \times \mathbf{E} = - j\omega \mathbf{B}, \quad (3.18)$$

kde se objevuje výraz $j\omega$, který je ekvivalentem parciální derivace sinusově měnícího se pole v závislosti na čase jako vynásobení daného fázoru právě výrazem $j\omega$. Užitím vzorce (3.6) obdržíme výraz:

$$\nabla \times \mathbf{E} = - j\omega \mu \mathbf{H}. \quad (3.19)$$

Rozšířením této rovnice obdržíme:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = - j\omega \mu \nabla \times \mathbf{H}, \quad (3.20)$$

kde doplněním ze vzorce (3.9) výraz zkrátíme na tvar:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{J}, \quad (3.21)$$

následným upravením podle základních pravidel vektorové algebry dostaneme rovnici:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\nabla^2 \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{J}, \quad (3.22)$$

a dosazením ze vzorce (3.5) obdržíme tento tvar:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = j\omega\mu\sigma\mathbf{E}, \quad (3.23)$$

Nyní předpokládáme, že vektorové pole \mathbf{E} má složku pouze podél osy x :

$$\nabla^2 E_x = j\omega\mu\sigma E_x. \quad (3.24)$$

Vyjádřením operátoru ∇ vede k parciální diferenciální rovnici druhého řádu:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} = j\omega\mu\sigma E_x. \quad (3.25)$$

Pokud předpokládáme, že E_x je pouze funkcí z (tzn. x a y se neliší od z), tak lze rovnici (3.25) zjednodušit do tvaru obyčejné diferenciální rovnice:

$$\frac{d^2 E_x}{dz^2} = j\omega\mu\sigma E_x. \quad (3.26)$$

Tuto rovnici lze zapsat jako:

$$E_x = E_{xp}e^{-\gamma z} + E_{xp}e^{+\gamma z}, \quad (3.27)$$

kde E_{xp} zastupuje velikostní faktor a γ je konstanta šíření [9], kterou lze vyjádřit pomocí měrného útlumu α a měrné fáze β ,

$$\gamma = \alpha + j\beta. \quad (3.28)$$

Dosazením hodnoty E_{xp} z rovnice (3.27) do rovnice (3.26) obdržíme tvar rovnice:

$$E_x = E_{xp}\gamma^2 e^{-\gamma z} + E_{xp}\gamma^2 e^{+\gamma z} = j\omega\mu\sigma(E_{xp}e^{-\gamma z} + E_{xp}e^{+\gamma z}), \quad (3.29)$$

kde vyřešením této rovnice dostaneme tvar:

$$\gamma^2 = j\omega\mu\sigma, \quad (3.30)$$

$$\gamma = \pm\sqrt{j\omega\mu\sigma}. \quad (3.31)$$

Pokud se pole E_x tvoří na povrchu vodiče při vzdálenosti $z = 0$, tak útlum tohoto pole nastává ve vzdálenosti $z > 0$ a proto hodnota γ musí být kladná:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu\sigma} = \sqrt{\omega\mu\sigma} \times \sqrt{1\angle 90^\circ} = \sqrt{\omega\mu\sigma} \times 1\angle 45^\circ = (1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}. \quad (3.32)$$

Nahrazením $\omega=2\pi f$ obdržíme tvar:

$$\gamma = (1 + j)\sqrt{\pi f\mu\sigma}. \quad (3.33)$$

A proto:

$$\alpha = \beta = \sqrt{\pi f\mu\sigma}. \quad (3.34)$$

Intenzita elektrického pole vyjádřená exponenciálním tvarem komplexního čísla v zápisu rovnice (3.27), o kterém se předpokládá, že je podél osy x a šíří a proniká ve směru osy z , má tvar:

$$E_x = E_{xp}e^{-\gamma z}, \quad (3.35)$$

který lze v časové oblasti zapsat jako:

$$E_x = E_{xp} e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z). \quad (3.36)$$

Nahrazením hodnot z rovnice (3.34) dostaneme tento tvar:

$$E_x = E_{xp} e^{-z\sqrt{\pi f\mu\sigma}} \cos(\omega t - z\sqrt{\pi f\mu\sigma}). \quad (3.37)$$

Použitím rovnice (3.5) udávající vztah mezi proudovou hustotou uvnitř vodiče a intenzitou elektrického pole kolem něj lze obdržet tento vztah:

$$J_x = \sigma E_x = \sigma E_{xp} e^{-z\sqrt{\pi f\mu\sigma}} \cos(\omega t - z\sqrt{\pi f\mu\sigma}). \quad (3.38)$$

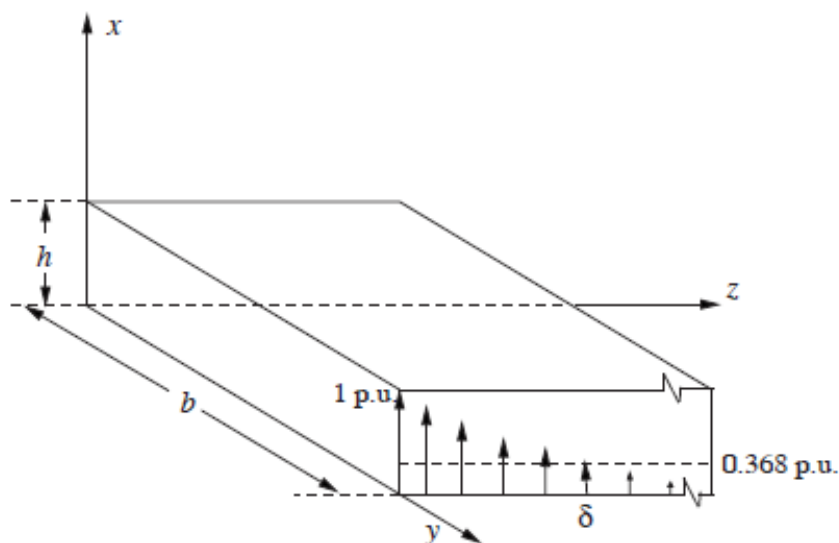
Rovnice (3.37) a (3.38) tvrdí, že při rostoucí vzdálenosti od zdroje intenzity elektrického pole, tedy povrchu vodiče, se velikost intenzity elektrického pole a proudové hustoty snižují exponenciálně. Ve vzdálenosti $z=1/\sqrt{\pi f\mu\sigma}$ proudová hustota klesne na 36,8 % ze své maximální hodnoty na povrchu vodiče neboť $e^{-1}=0,368$. Tato vzdálenost se nazývá hloubka vniku a značí se δ . Tuto vzdálenost lze vypočítat pomocí tohoto výsledného vzorce:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f\mu\sigma}}. \quad (3.39)$$

kde f je frekvence elektrického proudu, σ je měrná elektrická vodivost, neboli konduktivita, a μ je absolutní magnetická permeabilita vodiče.

3.3 Hloubka vniku

Hloubka vniku je jedním ze základních parametrů při analýze ztrát vířivými proudy ve feromagnetických a paramagnetických materiálech, které se vyznačují tím, že magnetické pole ve svém okolí zesilují a jsou ke zdroji tohoto pole přitahovány. Tento parametr určuje, jak již bylo zmíněno u rovnice hloubky vniku (3.39), v jaké hloubce vodivého materiálu, do kterého pronikají vířivé proudy indukované střídavým elektrickým proudem, klesne proudová hustota tohoto pole na 36,8 % ze své původní hodnoty. Při analýze ztrát vířivými proudy se uvažuje kmitočet Evropské elektrické



Obr. 3.2: Hloubka vniku

sítě 50 Hz. Teplotu materiálu ovšem nelze jednoduše určit. Konduktivita materiálu je velice závislá na teplotě. Relativní permeabilita je spíše teplotně nezávislá. Pro podrobnější určení parametrů materiálu je potřeba simulovat provoz transformátoru a zjistit a poté přepočítat tyto parametry na konkrétní teplotu. Poté lze vypočítat hloubku vniku u typické konstrukční oceli podle vzorce (3.39):

$$\delta_{\text{ocel}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi \times 50 \times 1.25663706212 \cdot 10^{-6} \times 1700 \times 6,3 \cdot 10^6}} = 0,68 \text{ mm.}$$

Z tabulky výpočtů je zřejmé, že běžná ocel, jako je například konstrukční ocel podle normy ČSN 11375, která se používá právě na konstrukční prvky transformátoru, má velmi malou hloubku vniku, neboť ocel je feromagnetický materiál jež lze snadno zmagnetizovat.

V případě distribučního transformátoru se analýza vířivých proudů využívá především v aktivní části transformátoru, kde tyto proudy způsobují velké ztráty ve

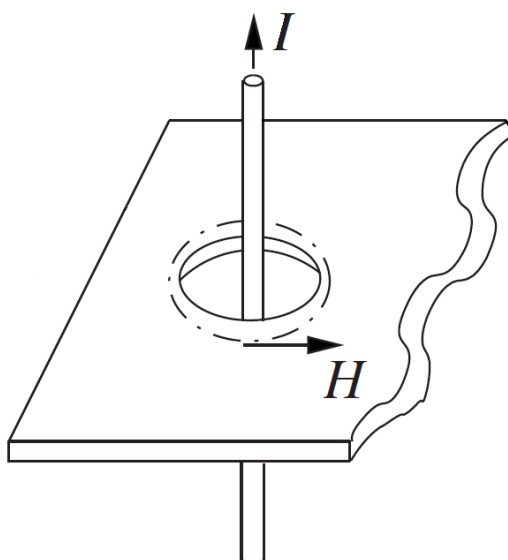
Tab. 3.1: Tabulka materiálů a vypočtené hloubky vniku

Materiál	Konduktivita σ [S/m]	Relativní permeabilita μ_r [-]	Hloubka vniku δ [mm]
Měď	$4,74 \times 10^7$	1	10,3
Mosaz	$1,67 \times 10^7$	1	17,4
Hliník	$2,98 \times 10^7$	1	13,2
Ocel ČSN 11375	$6,3 \times 10^6$	BH křivka, Obr. 3.7	0,68
Nerezová ocel AISI 304	$1,136 \times 10^6$	1,0037 [10]	66,65

formě tepla. Nemalé ztráty se vyskytují také v konstrukčních prvcích transformátoru, jako je nádoba a víko. Tato práce se ale zaměřuje na vířivé proudy v horním víku transformátoru v okolí NN průchodek, kde se tyto proudy také indukují.

Vodivá dráha uprostřed keramické NN průchodky se nejčastěji vyrábí z mědi nebo mosazi díky její výborné elektrické vodivosti. Pokud průchodkou teče střídavý elektrický proud, indukované vířivé proudy pronikají od povrchu průchodky do jejího středu.

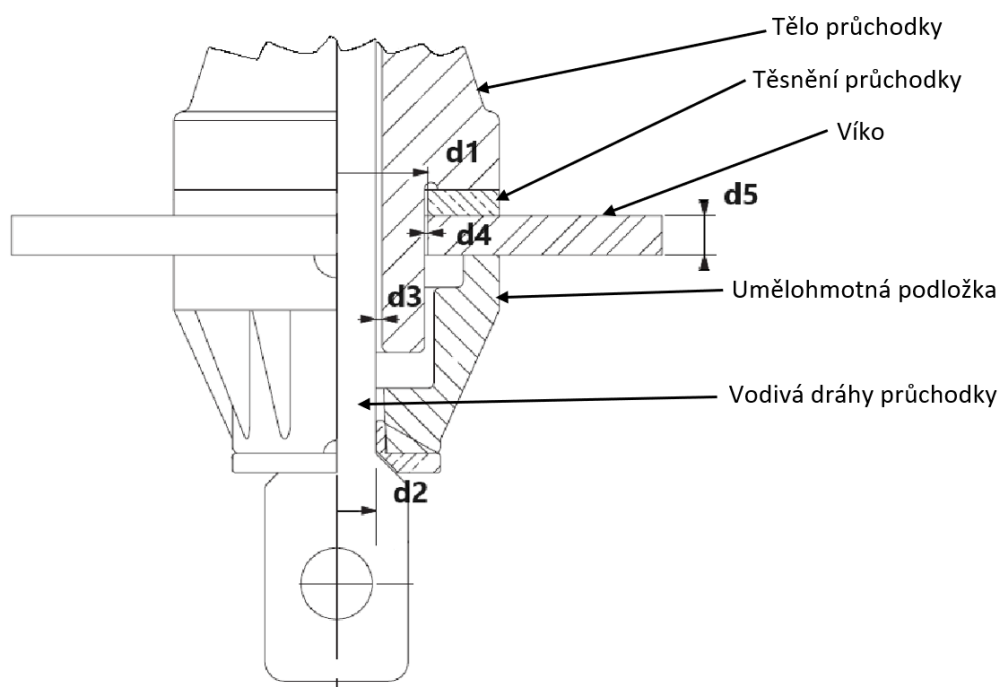
Vířivé proudy, šířící se radiálně od vodiče, se ovšem indukují i vně vodiče. Pokud je střídavý elektrický proud tekoucí průchodkou dostatečně velký, tak musejí nejprve tyto indukční čáry proniknout porcelánovou průchodkou, která má ovšem velký elektrický odpor a její relativní permeabilita je rovna jedné. To znamená, že elektrický odpor spolu s hloubkou vniku jsou extrémně velké a v průchodce žádné ztráty vířivými proudy nevznikají.



Obr. 3.3: Detail na zapojenou NN průchodku

Intenzita magnetického pole dále interaguje se samotným víkem transformátoru, jak lze vidět na Obr. 3.3. V Tab. 3.1 je vypočteno, že běžná ocel má velmi malou hloubku vniku a jde velice dobře zmagnetizovat, což znamená, že vířivé proudy dosahují značných hodnot a rozptylují se na velmi malé ploše. Tyto proudy způsobují přehřívání v těsné blízkosti průchodek, kde se nachází těsnění průchodky, které velice trpí z důvodu přehřívání víka.

Proto se na tyto víka navařuje plát z nerezové oceli, která má menší konduktivitu a proto zde vznikají menší ztráty a zároveň má větší hloubku vniku, kdy jsou tyto menší ztráty oproti běžné oceli rozptýleny na větší ploše horního víka v okolí průchodek. Podrobná ukázka zapojené NN průchodky je popsána na Obr. 3.4.



Obr. 3.4: Detail na zapojenou NN průchodku

Označení vzdálenosti	Vzdálenost [mm]
d_1	22,5
d_2	10
d_3	1
d_4	0,5
d_5	5

Tab. 3.2: Tabulka rozměrů zapojené NN průchodky z Obr. 3.4

3.4 Magnetizační křivka

Magnetizační křivka, zvaná též BH křivka, udává závislost magnetické indukce \mathbf{B} na intenzitě magnetického pole \mathbf{H} při vystavení určité látky magnetickému poli. Tento poměr určuje absolutní permeabilitu materiálu, značenou jako μ , kterou lze jednoduše určit podle vzorce:

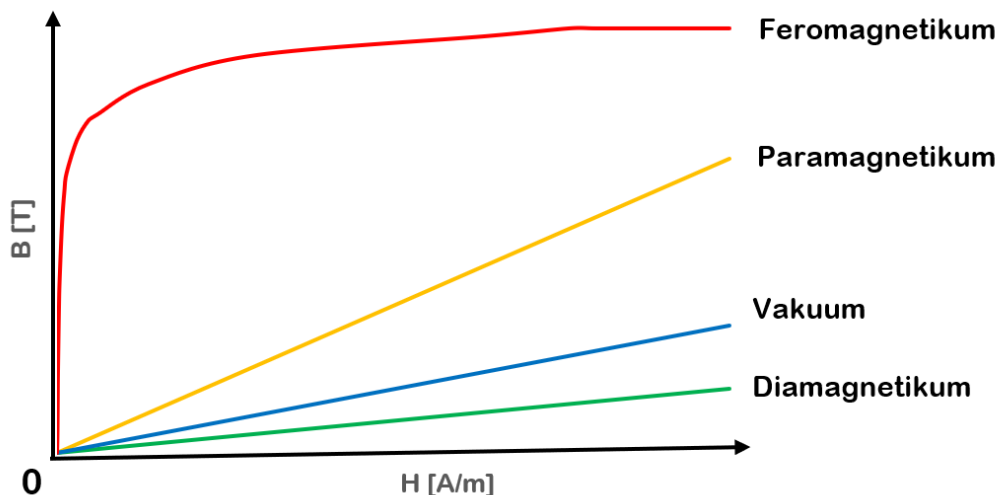
$$\mu = \frac{B}{H}. \quad (3.40)$$

Pro absolutní permeabilitu taktéž platí, že je rovna vynásobení relativní permeability materiálu μ_r permeabilitou vakua μ_0 :

$$\mu = \mu_r \times \mu_0. \quad (3.41)$$

Permeabilita vakua je konstanta, která vyjadřuje úměrnost mezi veličinami \mathbf{B} a \mathbf{H} ve vakuu a má danou velikost $\mu_0 = 1.25663706212 \times 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$. Diamagnetické látky jsou látky, které magnetické pole mírně zeslabují a jsou z něj vytlačovány. Patří zde ušlechtilé kovy (Au, Ag, Cu, aj.) a vyznačují se relativní permeabilitou menší než 1.

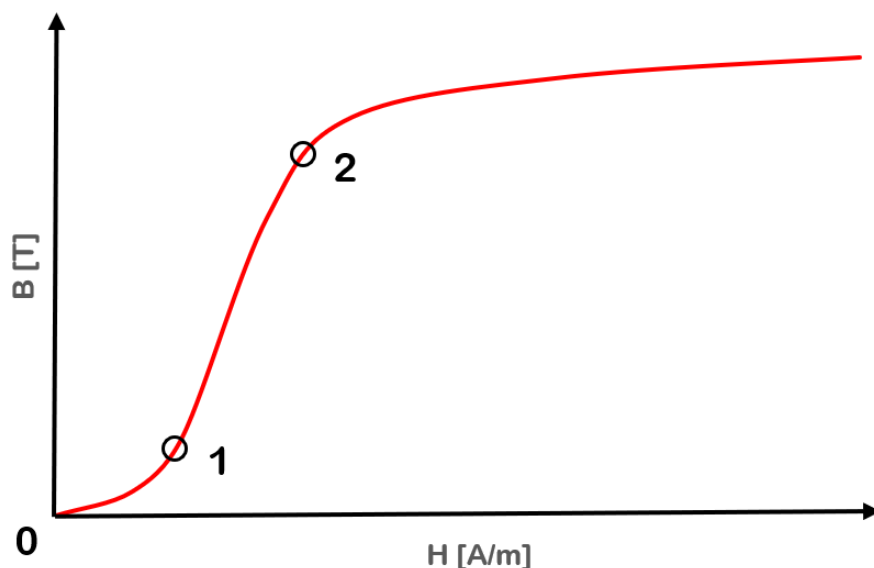
Další skupinou jsou látky paramagnetické, které magnetické pole mírně zesilují a jsou do něj mírně vtahovány. Mezi typické představitele patří řada kovů (Al, Cr, Pt, Mn, aj.), slitiny jako je nerezová ocel a nebo třeba vzduch. Jejich relativní permeabilita je trochu větší než jedna. Obě tyto skupiny látek mají magnetizační charakteristiku téměř lineární, Obr. 3.5, a proto lze jednoduše určit jejich relativní permeabilitu, která je konstantní.



Obr. 3.5: Magnetizační křivka různých skupin látek

Látky feromagnetické výrazně zesilují magnetické pole a jsou do něj silně vtahovány. V této skupině látek vznikají největší ztráty vířivými proudy, neboť jejich

relativní permeabilita je mnohem větší než jedna a závisí na intenzitě magnetického pole \mathbf{H} . Typickými zástupci jsou nikl, kobalt, železo (ocel) a jejich slitiny. Jejich magnetizační křivka je nelineární a proto nelze jednoduše matematickým vztahem určit hodnotu absolutní permeability [11]. Proto se relativní permeabilita materiálu musí stanovovat pro každý materiál měřením.

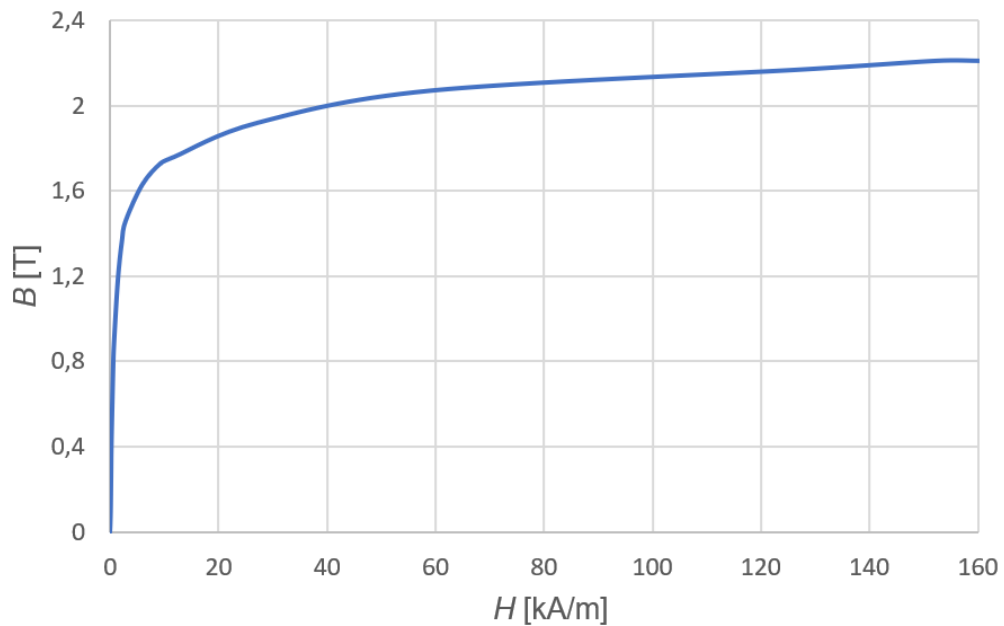


Obr. 3.6: Magnetizační křivka feromagnetických látek

U feromagnetických látek s nelineární charakteristikou na Obr. 3.6 lze rozdělit tuto křivku do čtyřech charakteristických oblastí [12]:

- **Oblast 0.** V tomto stavu jsou magnetické domény náhodně orientované, přičemž výsledný magnetický moment je nulový.
- **Oblast 0 - 1.** Vlivem magnetického pole se postupně zvyšuje počet magnetických domén v látce, jejichž směr momentu se nejvíce blíží směru působícího magnetického pole. Tento děj je vratný, neboť po vyjmutí látky z magnetického pole se látka vrací do bodu 0 a domény se opět samovolně uspořádají.
- **Oblast 1 - 2.** V této oblasti dochází ke zvětšování samotných domén, kdy se nejvíce zvětšují domény orientované právě ve směru působícího magnetického pole, čímž ho zesilují. Tento děj je nevratný a po vyjmutí látky z magnetického pole se magnetické domény již nenatáčejí do svého původního směru. Tato oblast se považuje za lineární a používá se k určování relativní permeability feromagnetického materiálu. Samotný bod 2 je bodem největší relativní permeability materiálu, $\mu_r = \max$.
- **Oblast za bodem 2.** Magnetické dipóly se již velice těžce otáčejí přičemž se magnetická indukce \mathbf{B} pouze nepatrně zvětšuje. Tato oblast se také nazývá oblastí nasycení feromagnetického materiálu.

Víko transformátoru je vyrobeno z konstrukční oceli typu S235JR, která je typickým zástupcem feromagnetické oceli. Průběh magnetizační křivky znázorněnou na Obr. 3.7 byl zjištěn měřením [7].



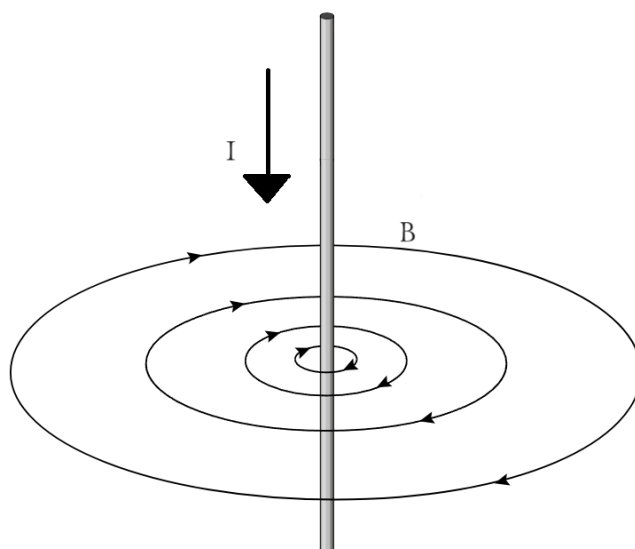
Obr. 3.7: Magnetizační křivka oceli S235JR

H [A/m]	B [T]	H [A/m]	B [T]
0	0	2909	1,46
73	0,04	5974	1,63
150	0,12	9358	1,73
220	0,27	11863	1,76
288	0,42	27281	1,92
586	0,76	59046	2,07
766	0,89	128000	2,17
1458	1,18	152350	2,21
2188	1,36	160350	2,21

Tab. 3.3: Tabulka jednotlivých bodů magnetizační křivky z Obr. 3.7

3.5 Magnetické pole v okolí vodiče

Každá nabitá částice, tedy i elektron, vytváří svým pohybem ve svém okolí magnetické pole, které závisí na velikosti náboje částice, rychlosti jejího pohybu a jeho akceleraci [13]. Takto vytvořené magnetické pole má tvar soustředných kružnic kolem vodiče kulatého tvaru, kterým protéká elektrický proud, což je uspořádaný pohyb nosičů elektrického náboje za jednotku času v daném průřezu daného vodiče. Směr rotace těchto kruhovitých čar je dán Ampérovým pravidlem pravé ruky, který říká: *Jestliže palec pravé ruky ukazuje směr elektrického proudu ve vodiči, pak pokrčené prsty ukazují orientaci magnetických indukčních čar.*



Obr. 3.8: Grafické znázornění magnetických indukčních čar v okolí vodiče

Dále lze o těchto indukčních čarách tvrdit toto:

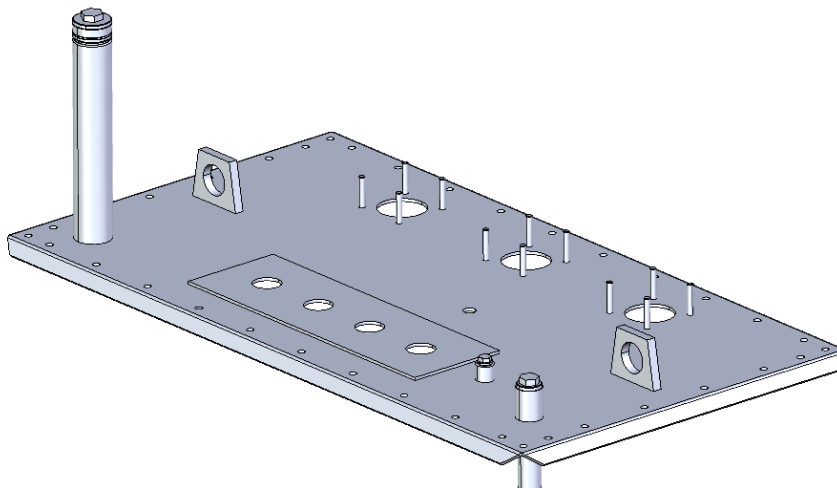
- Indukční čáry magnetického pole nikde nezačínají ani nekončí, ale tvoří uzavřené neviditelné kružnice.
- Tyto neviditelné čáry se indukují i uvnitř vodiče, kde způsobují při vysokých frekvencích a průřezech vodiče skin efekt.
- Indukční čáry magnetického pole jsou blíže u sebe v místech, kde je intenzita magnetického pole větší. V těsné blízkosti vodiče jsou indukční čáry sobě nejbližší, neboť právě zde je nejsilnější magnetické pole.

V případě rovného dlouhého vodiče lze intenzitu magnetického pole vypočítat v libovolné vzdálenosti od osy vodiče d , pokud je známý elektrický proud I tekoucí vodičem podle vzorce:

$$H = \frac{I}{2\pi d}. \quad (3.42)$$

4 Příprava simulace a výpočty

Pro simulaci ztrát vířivými proudy v horním víku transformátoru bylo vybráno víko od olejového distribučního transformátoru s výkonem 400 kVA. Toto víko se vyrábí z běžné konstrukční oceli typu S235JR (ČSN 11375) a v oblasti NN průchodek má kvůli vysokým ztrátám vířivými proudy navařený plát z nerezové oceli AISI 304 (ČSN 17240/17241).



Obr. 4.1: Kompletní konstrukční model víka distribučního transformátoru 400 kVA



Obr. 4.2: Kompletní konstrukční model NN průchodky 1 kV/630 A

Mezi základními výpočty potřebnými pro uskutečnění simulace je výpočet efektivní hodnoty střídavého elektrického proudu tekoucího proudovodnou dráhou NN průchodky I_{ef} , kterou lze určit dle vztahu:

$$I_{\text{ef}} = \frac{S_t}{U_s \times \sqrt{3}} = \frac{400000}{400 \times \sqrt{3}} = 577 \text{ A}, \quad (4.1)$$

kde U_s je sdružené napětí na výstupu z transformátoru a S_t je zdánlivý výkon transformátoru. Pro další výpočty je ovšem nutné počítat s amplitudou první harmonické, která se vypočte:

$$I_{\text{max}} = I_{\text{ef}} \times \sqrt{2} = 577 \times \sqrt{2} = 817 \text{ A}. \quad (4.2)$$

Podle vzorce (3.42) lze dopočítat intenzitu magnetického pole H_{max} na okraji otvoru pro NN průchodku ve víku:

$$H_{\text{max}} = \frac{I_{\text{max}}}{2\pi d} = \frac{817}{2 \times \pi \times 0,023} = 5653 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}, \quad (4.3)$$

kde d označuje vzdálenost mezi středem osy proudovodné dráhy a okrajem otvoru ve výřezu. A pokud je známá intenzita magnetického pole H_{max} , lze přibližně určit pomocí lineární interpolace dvou nejbližších bodů na magnetizační křivce oceli S235JR hodnotu magnetické indukce na okraji otvorů pro NN průchodky. Nejbližší hodnoty byly nalezeny v Tab. 3.3, kde nejbližší menší hodnota obdržela index 0 a nejbližší vyšší hodnota obdržela index 1. V následujícím vztahu, podle kterého se získá B_{max} :

$$B_{\text{max}} = B_0 + (H_{\text{max}} - H_0) \cdot \frac{(B_1 - B_0)}{(H_1 - H_0)} = 1,46 + (5779 - 2909) \cdot \frac{(1,63 - 1,46)}{(5974 - 2909)} = 1,62 \text{ T}. \quad (4.4)$$

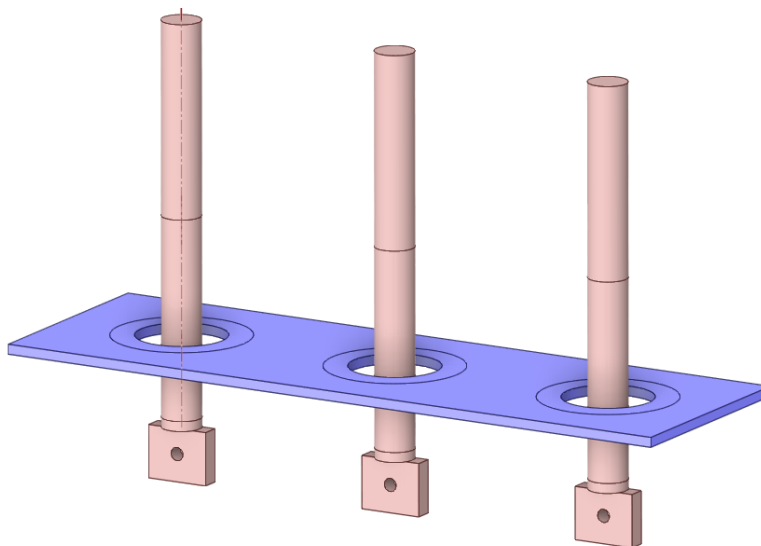
5 Elektromagnetická simulace

Pro elektromagnetickou analýzu vířivými proudy byl zvolen softwarový nástroj Ansys Maxwell, jež své výsledky vyhodnocuje na základě numerické metody konečných prvků (MKP).

5.1 Simulace s víkem z konstrukční oceli S235JR

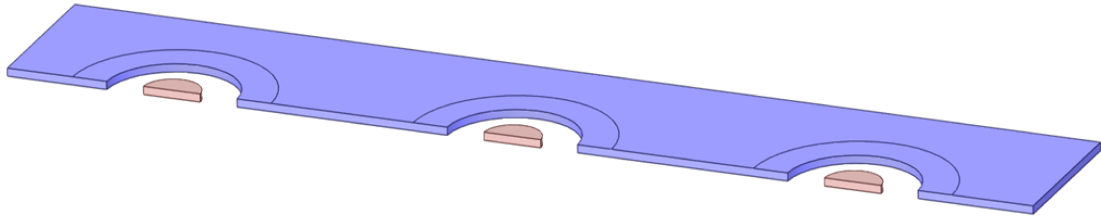
Jak již zaznělo v kapitole o výrobě transformátorového víka 1.3, víka transformátorů větších výkonů se upravují navařením výřezu z nemagnetické nerezové oceli, která snižuje ohmické ztráty vířivými proudy v okolí NN průchodek. Tento výřez lze použít jako pomyslnou hranici vzniku těchto ztrát při jejich analýze. Pokud na víku není použit výřez z nerezové oceli, žádný výřez se na víku samozřejmě nevyskytuje, ale rozměry potenciálního výřezu jsou použity při provádění simulací v této práci i v takovém případě.

Porcelánové tělo samotné NN průchodky společně s umělohmotnou podložkou lze taktéž zanedbat, neboť jejich materiály mají relativní permeabilitu μ_r blízkou 1, tudíž nijak neovlivňují nebo nejsou ovlivňovány magnetickým polem, a mají velmi vysokou rezistivitu. Další příslušenství NN průchodky, jako je montážní mosazná matice, mosazné podložky, mosazný připojovací praporec a samotné závity na proudovodné dráze lze opomenout díky velké vzdálenosti od víka. Posledním zjednodušením je nulový elektrický proud NN průchodkou vycházejícího z nulového uzlu, protože součet všech fázových proudů tekoucími průchodkami je v každém okamžiku roven nule v případě symetrického napájení transformátoru.



Obr. 5.1: Zjednodušený model pro 3D elektromagnetickou simulaci

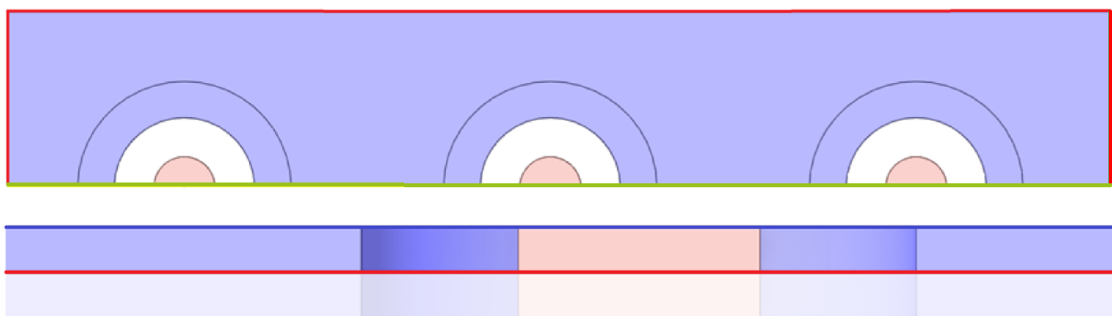
Těmito zjednodušujícími předpoklady lze model víka a proudovodných drah všech třech fází zjednodušit na samotný výřez s třemi fázovými průchodkami, jak lze vidět na Obr. 5.1.



Obr. 5.2: Výsledný zjednodušený model pro 3D elektromagnetickou simulaci

3D model výřezu a proudovodných tyčí byl nakonec zjednodušen do čtvrtinového modelu, viz Obr. 5.2. Simulovala se tedy pouze polovina tloušťky plechu a vertikální polovinu výřezu i s proudovodnými dráhami, které byly nakonec zkráceny pouze na tloušťku plechu. Toto zjednodušení lze provést díky symetrii modelu a lze díky němu dosáhnout větší přesnosti výsledku.

Jelikož byl 3D model zjednodušen díky jeho symetrii, bylo nutné nastavit okrajové podmínky popisující chování magnetické indukce na okrajích modelu, jak lze vidět na Obr. 5.3. Uprostřed tloušťky výřezu a na okrajích výřezu byla nastavena Dirichletova podmínka, která popisuje chování rovnoběžných siločár na zvolenou hranu. Na hranu řezu výřezem rovnoběžným s proudovodnými tyčemi byla nastavena Neumannova okrajová podmínka, jež popisuje hranu kolmou na působící magnetické siločáry. Na horní hraně výřezu byla zvolena izolující okrajová podmínka,

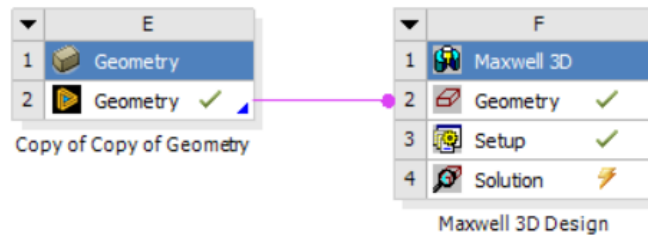


- Neumannova okrajová podmínka
- Dirichletova okrajová podmínka
- Izolující okrajová podmínka

Obr. 5.3: Okrajové podmínky pro elektromagnetickou simulaci

protože na tuto hranu žádné siločáry nepůsobí.

Za použití platformy Workbench Ansys, propojující modelovací a simulační programy, byl vytvořen projekt propojující 3D model zhotovený v modelovacím programu SpaceClaim a simulační nástroj Ansys Maxwell, jak lze vidět na Obr. 5.4.



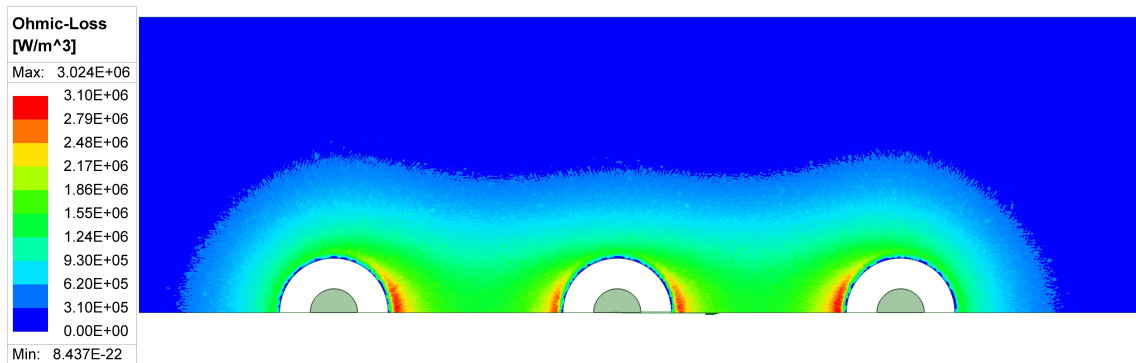
Obr. 5.4: Propojení projektu skrze platformu Workbench Ansys

V této simulaci je transformátorové víko z oceli S235JR a proudovodné dráhy NN průchodek z mosazi CuZn40Pb2. Model simuluje běžný provoz transformátoru při maximálním zatížení. Jednotlivé proudové excitace byly nastaveny na amplitudy proudu vypočtené ve vzorci (4.2) a mezi jednotlivými excitacemi v průchodkách byl nastaven fázový posun 120° , neboť transformátor je napájen trojfázovým sinusovým napětím, čímž je simulován běžný stav nebo stav při rutinních zkouškách transformátoru, případně při oteplovací zkoušce.

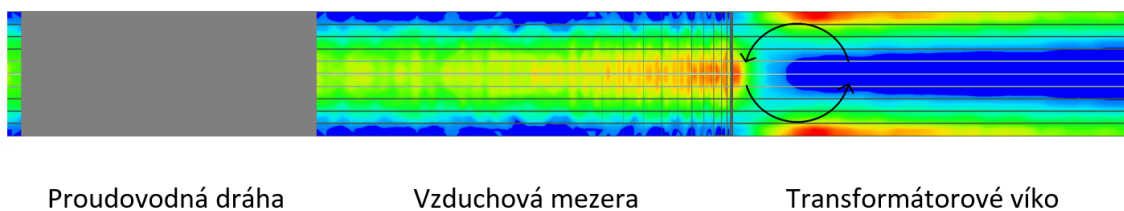
Jemnost sítě byla kromě adaptivní sítě zvolena nastavením minimální délky hrany čtyřstěnu na 1 mm ve výřezu víka. Při tomto nastavení bylo dosaženo výsledků s požadovanou tolerancí. Celkový počet čtyřstěnu byl 1,2 miliónu. Maximální počet průchodů adaptivní sítě byl nastaven na 10 konvergencí nebo ukončení po dosažení minimální chyby 0,1 %.

Výsledky z této simulace ukazují velikost ohmických ztrát vířivými proudy ve víku při plném výkonu transformátoru. Z Obr. 5.5 lze předpokládat, že prostřední těsnění pod NN průchodkou bývá nejvíce tepelně namáhána. Výsledné ohmické ztráty v modelu zahrnující pouze čtvrtinu výřezu a proudovodných drah jsou 16,86 W, tudíž výsledné ohmické ztráty v celém výřezu jsou 67,44 W.

Detailní pohled na řez transformátorového víka ukazuje konkrétní místa vzniku tepelných ztrát. Vířivé proudy vznikající ve víku jsou indukované v jednom kuse ocelového víka, takže magnetickým indukčním čarám nic nebrání uzavírat se v kružnicích kolem proudovodné dráhy, což maximalizuje vznik těchto ztrát. Tento jev zobrazený na Obr. 5.6 ukazuje, že maximální ohmické ztráty vznikají v blízkosti otvorů, nejvíce mezi fázemi. Tento obrázek je vytvořen horizontálním zrcadlením výsledné simulace. Pokud by nebyla brána v potaz skutečná tloušťka víka, tak vířivé ztráty ve víku by vznikaly pouze v těsné blízkosti ocelového víka na jeho rozhraní s otvorem pro průchodku. Tyto ohmické ztráty jsou znázorněny v 2D simulaci na Obr. 5.7.



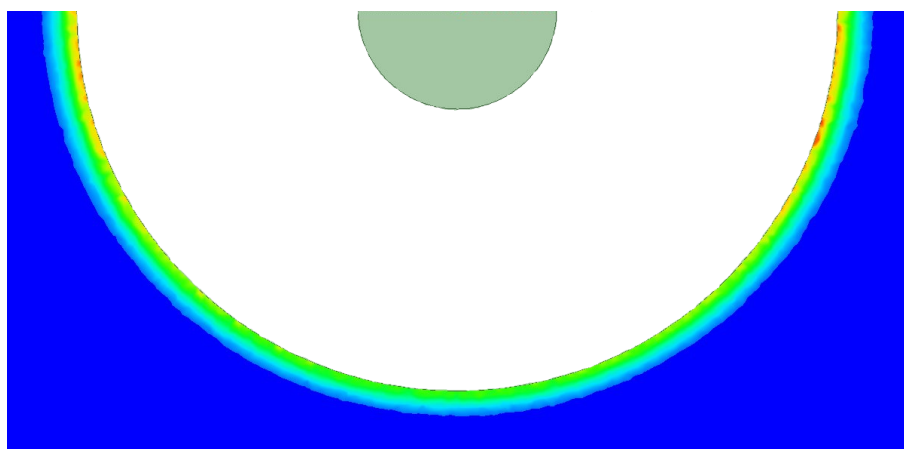
Obr. 5.5: Výsledek 3D simulace vířivých ztrát ve víku z oceli S235JR z horního nebo dolního pohledu



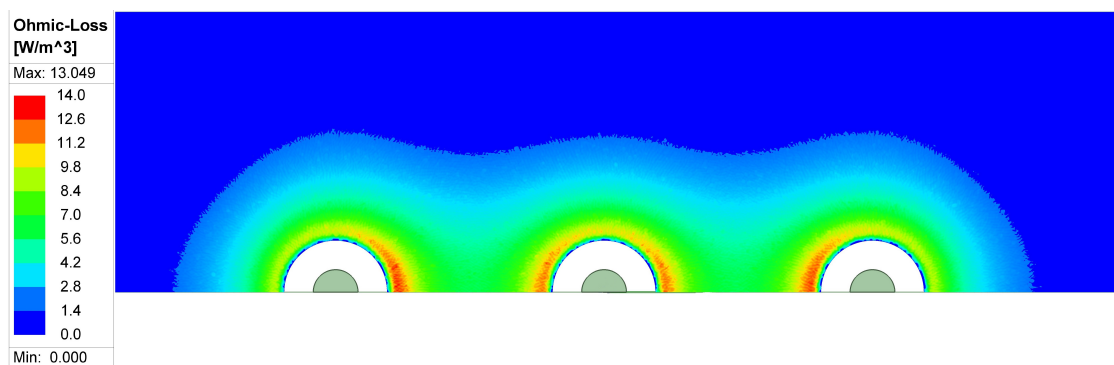
Obr. 5.6: Zrcadlený výsledek 3D simulace vířivých ztrát v řezu ve víku z oceli S235JR

5.2 Simulace s víkem z nerezové oceli AISI 304

Při této analýze vířivých proudů bylo nastavení 3D simulace naprosto totožné jako v kapitole 5.1, pouze s tím rozdílem, že se změnil materiál výřezu transformátorového víka na nerezovou ocel AISI 304. Rozměr tohoto výřezu odpovídá skutečným rozměrům nerezového plátu, který se navařuje na víka z konstrukční oceli S235JR z důvodů snížení vzniku vířivých ztrát. Tím, že nerezová ocel má hodnotu relativní permeability μ_{rn} blízkou 1 a hloubka vniku je mnohem větší než u běžné oceli, dochází ve vzniku zanedbatelných ztrát vířivými proudy a ztráty jsou více rozptýleny v objemu výřezu, jak lze vidět na Obr. 5.8. Také lze na tomto obrázku vidět stupnici ohmických ztrát ukazující, že ztráty v nerezové oceli jsou o 5 řádů menší.



Obr. 5.7: Výsledek 2D simulace vzniku vířivých ztrát ve víku s nekonečnou tloušťkou z oceli S235JR



Obr. 5.8: Výsledek 3D simulace vířivých ztrát ve víku z nerezové oceli AISI 304

6 Úvod k tepelným výpočtům

Tepelné ztráty patří k největším problémům při návrhu elektrických strojů, neboť většina ztrát v těchto zařízeních se přeměňuje právě na teplo. Snahou konstruktérů je proto tyto ztráty eliminovat nebo efektivně odvádět.

Ke sdílení tepla dochází tehdy, když se minimálně dvě a více soustav o rozdílných teplotách snaží dosáhnout rovnovážného stavu, jak tvrdí [14]. Teplejší těleso vždy předává část své vnitřní energie chladnějšimu tělesu. Tepelná energie se šíří kondukcí, konvekcí nebo radiací. Podle [15] se v elektrických strojích nejčastěji uplatňuje kombinací sdílení tepla kondukcí a konvekcí do proudícího oleje nebo vzduchu.

6.1 Sdílení tepla kondukcí

Sdílení tepla kondukcí, neboli vedením, se uplatňuje v pevných látkách nebo tekutinách. Kmitající částice látky s vyšší vnitřní kinetickou energií předávají část své pohybové energie částicím látky o nižší kinetické energii pomocí vzájemných srážek. Sdílení tepla kondukcí vyžaduje prostředí, ve kterém se vyskytují částice, jak prohlašuje [15].

6.2 Sdílení tepla konvekcí

Sdílení tepla konvekcí, neboli prouděním, je způsob tepelné výměny u tekutin a plynů způsobený prouděním hmoty o různé teplotě. Tento způsob šíření tepla se nevyskytuje u pevných látek z důvodu pevných vazeb částic v samotné látce. Nicméně [16] tvrdí, že konvekce využívá i principů kondukce, neboť s přenosem tepla dochází i k přenosu samotné látky. Poté dochází k samovolnému proudění látky na základě odlišných hustot při rozdílné teplotě, kdy látka o vyšší teplotě má hustotu nižší a tedy stoupá vzhůru.

6.3 Sdílení tepla radiací

Sdílení tepla radiací, neboli sáláním, nevyžaduje hmotné prostředí, tudíž ke sdílení tepla radiací dochází i ve vakuu. Přenos tepelné energie probíhá na základě elektromagnetického záření, které je z každého tělesa přirozeně vyzařováno, pokud je jeho teplota vyšší než 0 K. [16] tvrdí, že teplota tělesa poté určuje vlnovou délku tohoto záření.

6.4 Výpočet součinitelů přestupů tepla

Přestup tepla je děj, při kterém dochází k přenosu tepelné energie na rozhraní dvou látek rozdílných teplot. Množství přeneseného tepla Q přes rozhraní dvou látek lze určit podle [17] vztahem:

$$Q = \alpha A \tau \Delta_t, \quad (6.1)$$

kde α je součinitel přestupu tepla, A určuje plochu, přes kterou k tepelné výměně dochází, τ je čas, a Δ_t je teplotní rozdíl látek, které se snaží docílit totožné teploty. A pokud součinitel přestupu tepla není znám, lze ho dopočítat podle vztahu:

$$R = \frac{L}{\lambda A}, \quad (6.2)$$

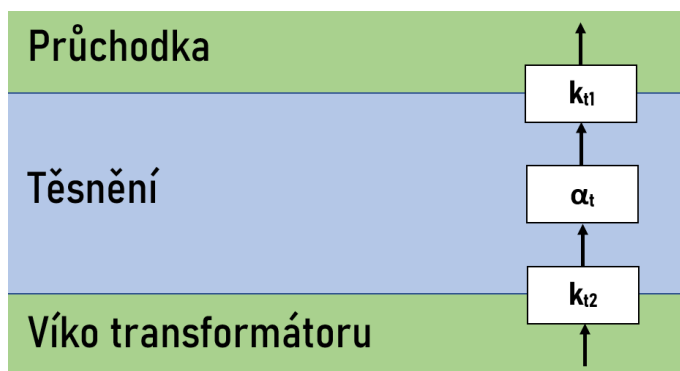
kde R zastupuje tepelný odpor, L je tloušťka odporové vrstvy, λ je součinitel tepelné vodivosti a A je plocha styku. A vzájemný vztah mezi součinitelem tepelné vodivosti λ , součinitelem přestupu tepla α a tloušťkou odporové vrstvy L je:

$$\alpha = \frac{\lambda}{L}. \quad (6.3)$$

6.4.1 Součinitel přestupu tepla těsnění průchodky

Těsnění NN transformátorové průchodky je vyrobeno z přírodní pryže, která má součinitel tepelné vodivosti λ_t roven $0,15 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$. Těsnění je tlusté pět milimetrů, ovšem při montáži je těsnění přitlačeno na víko transformátoru z důvodu těsnosti, a proto se počítá s tloušťkou pouze čtyř milimetrů. Poté lze podle (6.3) součinitel přestupu tepla těsněním vypočítat:

$$\alpha_t = \frac{\lambda_t}{L} = \frac{0,15}{4 \cdot 10^{-3}} = 37,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}. \quad (6.4)$$



Obr. 6.1: Součinitele přestupu tepla a stykového odporu v těsnění

Výpočet celkového součinitele přestupu tepla těsněním α_{tcelk} se provede sečtením převrácených hodnot všech zahrnutých součinitelů, a to již vypočteného součinitele přestupu tepla těsněním α_t a součinitelů stykového odporu k_{t1} a k_{t2} , které se určují na základě drsnosti, tlaku a použitých materiálů kontaktů a má totožné rozměry jako součinitel přestupů tepla, jak zmiňuje [18]. Vše lze podrobně vidět na Obr. 6.1, kde je znázorněn řez materiály se všemi koeficienty. Ty lze vypočítat podle následného vzorce:

$$k_t = \frac{1}{R_{\text{st}} \cdot S}, \quad (6.5)$$

kde R_{st} je stykový odpor a S je plocha kontaktu. Poté lze celkový součinitel vypočítat takto:

$$\frac{1}{\alpha_{\text{tcelk}}} = \frac{1}{k_{t1}} + \frac{1}{\alpha_t} + \frac{1}{k_{t2}} = \frac{1}{\alpha_t}. \quad (6.6)$$

Kvůli vysoké teplotě a tlaku působícího na těsnění a samotným materiálovým vlastnostem pryže lze oba součinitele stykového odporu zanedbat a proto celkovým součinitelem přestupu tepla těsněním α_{tcelk} je již vypočtená hodnota $37,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$.

6.4.2 Součinitel přestupu tepla na kontaktech s olejem

Pomocí stejného postupu lze vypočítat i tepelné kontakty, které jsou ve styku s transformátorovým olejem. Z Tab. 3.2, kde jsou vypsány rozměry NN průchodky, lze nalézt velikost mezery mezi mosaznou proudovodnou dráhou průchodky a porcelánovým tělem průchodky zaplněným transformátorovým olejem, která odpovídá 2,5 mm. Podle normy ČSN EN 60085 ED.2 olejový transformátor používající izolační materiál třídy A má konečnou provozní teplotu 105 °C. Součinitel tepelné vodivosti transformátorového oleje λ_o má při teplotě 105 °C hodnotu $0,105 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ [19]. Zbývá už jen hodnoty dosadit do vzorce (6.3) a výsledný součinitel pro kontaktní plochy různých materiálů s transformátorovým olejem o teplotě 105 °C vyjde:

$$\alpha_o = \frac{\lambda_o}{L} = \frac{0,105}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 42 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}. \quad (6.7)$$

6.4.3 Součinitel přestupu tepla konvekcí vzduchu

Pro součinitel přestupu tepla pomocí konvekce vzduchu již nelze postupovat podle předchozích vzorců nebo postupů. Každý případ konvekce je specifický a vyžaduje vzorec pro konkrétní případ. Podle vzorce pro vodorovnou plochu rovinu směrem nahoru se dle [20] vypočítá součinitel přestupu tepla konvekcí vzduchu:

$$\alpha_{\text{kv1}} = 2,5t^{1/4}, \quad (6.8)$$

přičemž t je rozdíl teplot povrchu víka transformátoru a okolního vzduchu. Podle normy ČSN EN 61558-2-1 ED.2 je určena maximální teplota okolí 40 °C. Při návrhu

elektrického stroje je nutno vždy počítat s nejnepříznivějšími možnými podmínkami, a proto po dosažení maximálních provozních teplot transformátoru a okolí vyjde součinitel přestupu tepla konvekcí vzduchu takto:

$$\alpha_{kv1} = 2,5t^{1/4} = 2,5 \cdot (105 - 40)^{1/4} = 7,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}. \quad (6.9)$$

U této konvekce vzduchu se podle [21] nesmí zapomenout na kombinované sdílení tepla, a to sdílení tepla pomocí konvekce a radiace. V tomto případě je uvažováno, že polovina tepla se odvede volnou konvekcí a polovina tepla se odvede radiací. Jedná se pouze o předpoklad, k přesnému rozdělení je třeba složitých výpočtů popsanych v [20]. A protože nelze určit přesnou teplotu okolního vzduchu a ostatní podmínky prostředí, ve kterých se transformátor nachází, byly zvoleny nejnepříznivější dovolené podmínky odvodu tepla do okolí. Při této úvaze výsledný součinitel přestupu tepla konvekcí vzduchu se zahrnutou radiací vyjde:

$$\alpha_{kv} = \alpha_{kv1} \cdot 2 = 7,1 \cdot 2 = 14,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}. \quad (6.10)$$

6.4.4 Součinitel přestupu tepla konvekcí oleje v transformátoru

Pro součinitel přestupu tepla pomocí konvekce oleje taktéž nelze postupovat podle předchozího postupu. Pro konvekci, při které je teplý horizontální povrch směřován směrem dolů, lze podle [21] postupovat pomocí těchto vzorců:

$$L_c = \frac{A_s}{p} = \frac{L_v^2}{4L_v} = \frac{L_v}{4} = \frac{0,8}{4} = 0,2 \text{ m}, \quad (6.11)$$

kde L_v je délka víka transformátoru a L_c je charakteristická délka víka. Dále je nutné vypočítat teplotu oleje aproximovanou uvnitř konvekční vrstvy zvanou střední teplota filmu T_f podle vzorce:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{(90 + 105)}{2} + 273 = 370,5 \text{ K}, \quad (6.12)$$

kde T_s je odhadovaná teplota víka a T_∞ je teplota oleje. Díky tabulkovým hodnotám z [20] lze pro olej o teplotě 105 °C určit hodnotu Prandtlovoého čísla Pr, které je 60, a rychlost proudícího oleje v , pro kterou se udává hodnota $0,38 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$. Nyní lze vypočítat Rayleighovo číslo Ra podle vzorce:

$$\text{Ra} = \frac{g \cdot T_f^{-1}(T_s - T_\infty) \cdot L_c^3}{v^2} \cdot \text{Pr} = \frac{9,81 \cdot (370,5)^{-1}(-90 + 105) \cdot 0,2^3}{(0,38 \cdot 10^{-5})^2} \cdot 60 = 1,32 \cdot 10^{10}, \quad (6.13)$$

kde g je tíhové zrychlení. Nyní je potřeba vypočítat Nusseltovo číslo Nu podle vzorce:

$$\text{Nu} = 0,27 \cdot \text{Ra}^{1/4} = 0,27 \cdot (1,32 \cdot 10^{10})^{1/4} = 91,52. \quad (6.14)$$

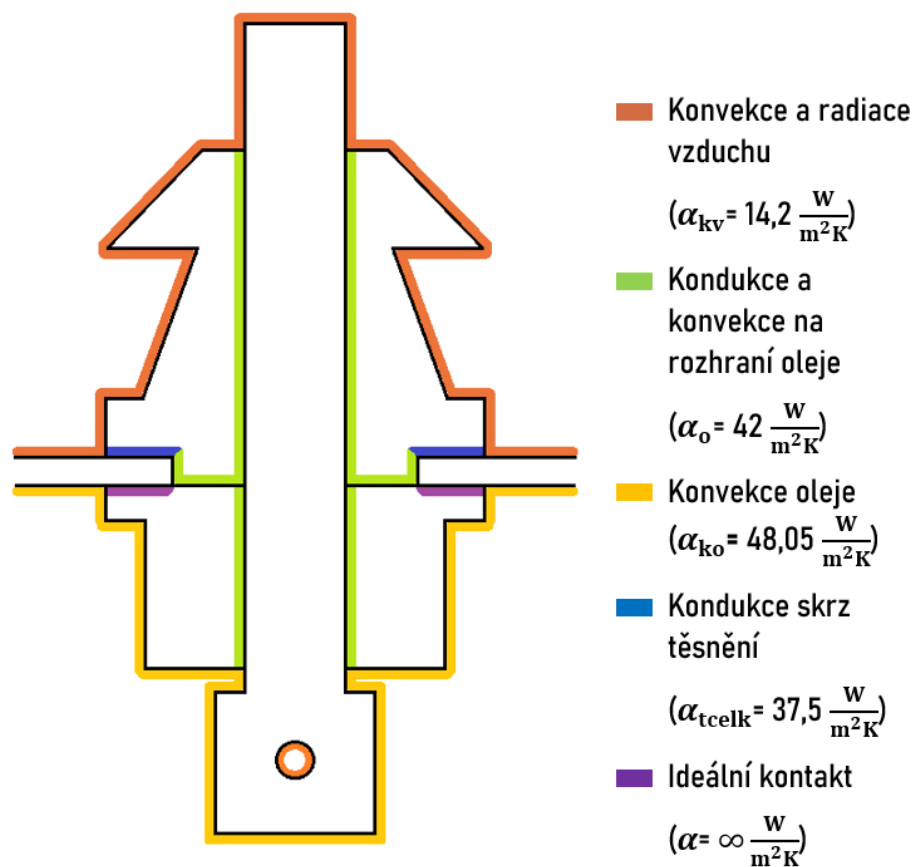
Součinitel přestupu tepla konvekcí oleje se poté vyřeší výsledným vzorcem:

$$\alpha_{ko} = \frac{\lambda_o}{L_c} \cdot Nu = \frac{0,105}{0,2} \cdot 91,52 = 48,05 \frac{W}{m^2 \cdot K}, \quad (6.15)$$

kde λ_o zastupuje součinitel tepelné vodivosti transformátorového oleje stanoveného v podkapitole 6.4.2.

6.4.5 Součinitel přestupu tepla na kontaktech s podložkou

Zbývá už jen určit součinitel přestupu tepla na kontaktech umělohmotné podložky a transformátorového víka. Ten je opět z důvodu vysokého tlaku na podložku a relativně měkkému materiálu nekonečný, tudíž jeho kontaktní odpor je nulový.



Obr. 6.2: Součinitele přestupů tepla a stykového odporu

7 Tepelná simulace

Pro tepelnou analýzu oteplení transformátorového víka byl zvolen softwarový nástroj Steady-State Thermal, který byl rovněž propojen díky platformě Workbench Ansys s vytvořeným 3D modelem v programu SpaceClaim. Tato tepelná analýza je vyhodnocována podle metody konečných prvků (MKP).

7.1 Rezistivita proudovodné dráhy NN průchodky

Elektrický odpor kovů je v závislosti na teplotě rostoucí a to platí i pro mosaz CuZn40Pb2, ze které se vyrábí proudovodná dráha NN průchodky. Při tepelné analýze je potřeba brát na toto hledisko ohled, neboť provozní teplota proudovodné dráhy se zdaleka neblíží teplotě, při které se stanovuje měrný elektrický odpor materiálu ρ_0 , která je 20 °C. Pro výpočet přesné hodnoty měrného elektrického odporu ρ_m při konkrétní teplotě je nutné tuto hodnotu přepočítat pomocí teplotního součinitele elektrického odporu mosazi α_m , který je roven $0,001 \frac{1}{K}$.

Teplotu proudovodné dráhy je nutné určit pomocí iterační metody, neboť rezistivita mosazi je závislá na její teplotě, přičemž při zvýšení její rezistivity dojde ke zvětšení vznikajících ohmických ztrát a tedy i k opětovnému zvýšení její teploty. Teplota proudovodné dráhy byla během první iterace tepelné analýzy s nominální rezistivitou mosazi zjištěna na 124° C. Při následném přepočítání rezistivity mosazi na teplotu 124° C podle vzorce (7.1) a spuštěním tepelné analýzy byla zjištěna teplota proudovodné dráhy 125° C, což lze již považovat za ustálenou hodnotu. Poté lze výslednou rezistivitu mosazi CuZn40Pb2 při 125 °C vypočítat pomocí vzorce:

$$\rho_m = \rho_0 \cdot (1 + \alpha_m \cdot \Delta t) = 6,7 \cdot 10^{-8} \cdot [1 + 0,001 \cdot (125 - 20)] = 7,4 \cdot 10^{-8} \frac{\Omega}{m}. \quad (7.1)$$

7.2 Výpočet zdrojů vnitřního tepla

Dále je nutné zahrnout ohmické ztráty zjednodušeného modelu výřezu z oceli S235JR, které mají označení ΔP_v . Tyto ztráty byly pomocí nástrojového kalkulátoru vypočítány z obdržných výsledků elektromagnetické analýzy symetrické čtvrtiny výřezu o objemu V_v . Poté lze elementárním vzorcem vypočítat měrné ohmické ztráty ve výřezu p_v :

$$p_v = \frac{\Delta P_v}{V_v} = \frac{16,86}{45,73 \cdot 10^{-6}} = 368686 \frac{W}{m^3}. \quad (7.2)$$

Tyto měrné ohmické ztráty se nemění s teplotou, neboť elektrická vodivost a permeabilita jsou téměř teplotně nezávislé.

Nyní zbývá určit měrné ohmické ztráty v proudovodných dráhách NN průchodek p_m . Materiálem těchto drah je mosaz CuZn40Pb2, jejíž přepočítanou elektrickou

vodivosti při teplotě 125 °C je hodnota vypočtená pomocí vzorce (7.1). Teplota 125° C byla určena pomocí iterace v tepelném modelu v kapitole 7.1. Pro odvození rovnice na výpočet měrných ohmických ztrát v proudovodných dráhách p_m je nutný vzorec ohmických ztrát v elektrickém vodiči ΔP :

$$\Delta P = R \cdot I_{ef}^2, \quad (7.3)$$

kde I_{ef} je efektivní hodnota protékajícího elektrického proudu, a vzorec na výpočet elektrické rezistivity ρ :

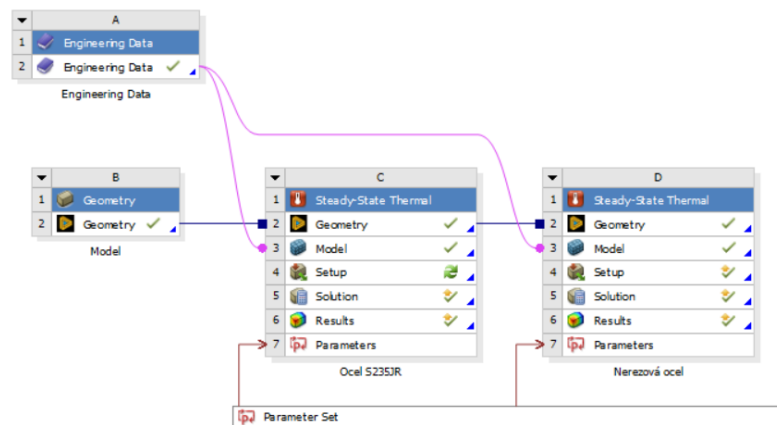
$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}, \quad (7.4)$$

kde S je průřez vodiče, l je jeho délka a R je jeho elektrický odpor. Spojením a úpravou těchto dvou vzorců, (7.3) a (7.4), a jejich dosazením do vzorce (7.2) lze obdržet vztah pro výpočet měrných ohmických ztrát v proudovodných dráhách:

$$p_m = \frac{\Delta P_m}{V_m} = \frac{R_m \cdot I_{ef}^2}{S_m \cdot l_m} = \frac{\rho_m \cdot l_m \cdot I_{ef}^2}{S_m \cdot l_m \cdot S_m} = \frac{\rho_m \cdot I_{ef}^2}{S_m^2} = \frac{7,4 \cdot 10^{-8} \cdot 577^2}{(\pi \cdot 0,01^2)^2} = 242622 \frac{W}{m^3}. \quad (7.5)$$

7.3 Tepelná analýza víka transformátoru s výřezem z oceli S235JR

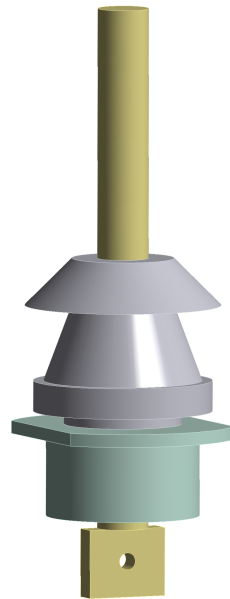
Pro tepelnou analýzu oteplení transformátorového víka byl zvolen softwarový nástroj Steady-State Thermal, který byl rovněž propojen díky platformě Workbench Ansys s vytvořeným 3D modelem v programu SpaceClaim, materiálovou knihovnou Engineering Data a Parametrovým blokem s použitými parametry, viz Obr. 7.1.



Obr. 7.1: Propojení projektu skrze platformu Workbench Ansys

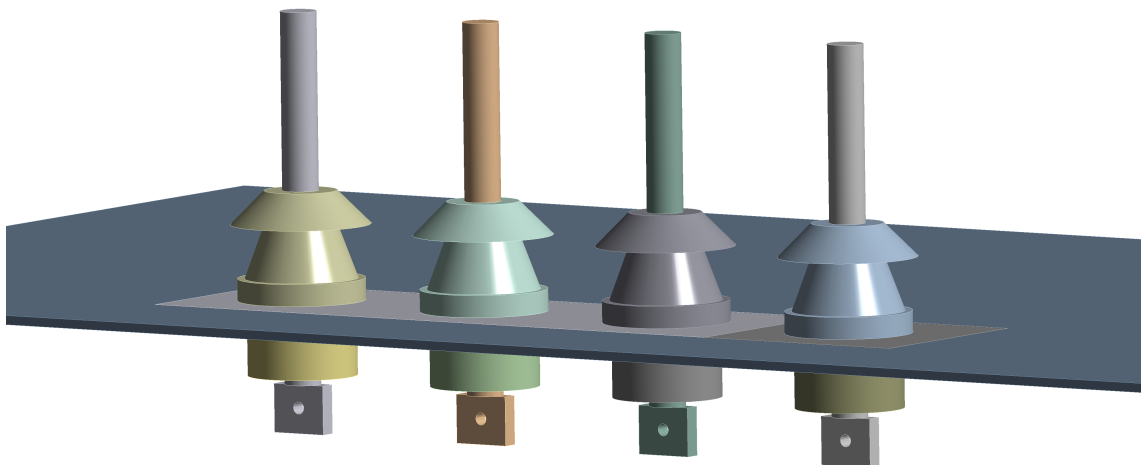
Navržený model již zahrnoval veškerou geometrii víka i průchodek, neboť každý materiál určitým způsobem vede teplo. Výsledná geometrie, zobrazená na Obr. 7.3,

zahrnuje celé víko i se samotným výřezem z oceli S235JR, všechny NN průchodky s proudovodnými dráhami z mosazi CuZn40Pb2, s porcelánovými izolátory a umělohmotnými podložkami. Především 3D modely NN průchodek jsou v této analýze



Obr. 7.2: Zjednodušený model NN průchodky

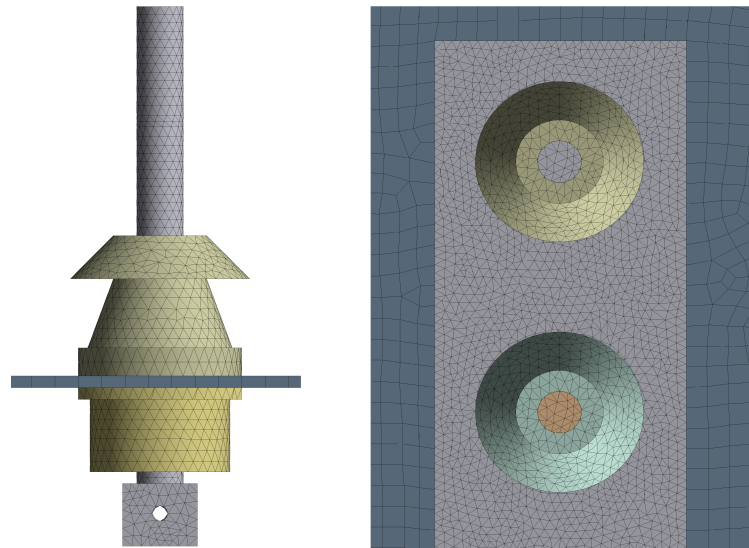
zjednodušeny zbavením se zakulacených hran porcelánových izolátorů, odstraněním mosazných matic, mosazných podložek a závitů na proudovodných dráhách. Díky tomuto zjednodušení lze dosáhnout zkrácení času simulace s podobnou přesností výsledků.



Obr. 7.3: Zjednodušený model víka s průchodkami

Navržený tepelný model simuluje běžný provoz transformátoru při plném výkonu. Ohmické ztráty vířivými proudy zjištěné elektromagnetickou analýzou jsou do této

simulace dodány jako zdroje vnitřního tepla ve výřezu. Zdroj vnitřního tepla ve výřezu byl vypočten v kapitole 7.2 společně s ohmickými ztrátami v proudovodných dráhách NN průchodek. Dále byly nastaveny součinitele konvekce vzduchu při maximální předpokládané teplotě na našem území 40 °C a konvekce transformátorového oleje při teplotě 105 °C, vypočtené v kapitolách 6.4.3 a 6.4.4. Následně byly přiřazeny veškeré tepelné kontakty mezi objekty, mezi kterými byl vypočten součinitel přestupu tepla v kapitolách 6.4.1, 6.4.2 a 6.4.5. Jemnost sítě byla nastavená s délkou

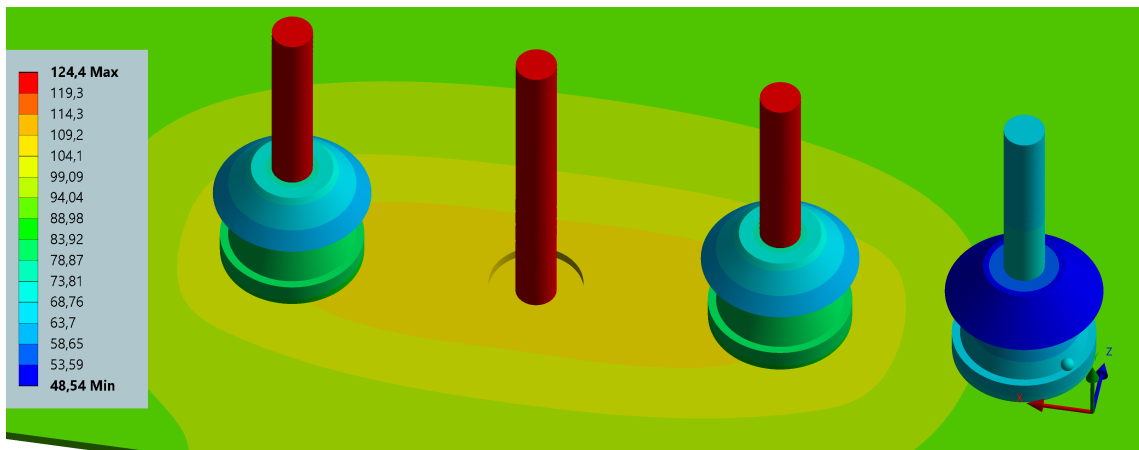


Obr. 7.4: Detailní pohled na simulační mřížku tepelného modelu

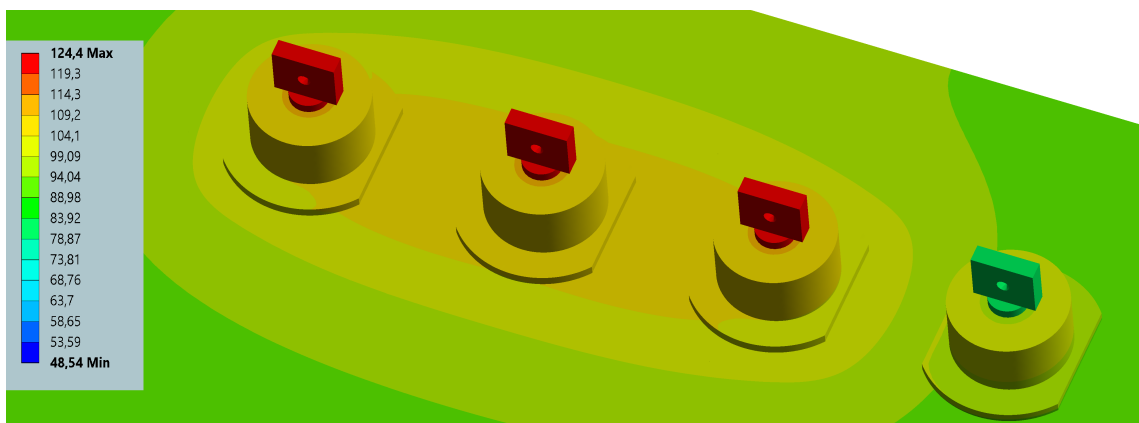
hrany krychle na 4 mm u proudovodných tyčí a výřezu kolem NN průchodek kvůli podrobnějším výsledkům simulace. U zbylých objektů, jako bylo víko bez samotného výřezu a porcelánové a umělohmotné části NN průchodek, se zvolila hrubší síť (5 a 10 mm), jak lze vidět na Obr. 7.4. Výsledná síť celého tepelného modelu má kolem 280 tisíc elementů.

Následně byly přidány zdroje vnitřního tepla do objektů, ve kterých vznikají ohmické ztráty vířivými proudy nebo ohmické ztráty vznikající protékajícím elektrickým proudem, které byly vypočteny v kapitole 7.2.

Výsledky této tepelné simulace ukazují oteplení víka z oceli S235JR a NN průchodek při plném výkonu transformátoru. Maximální teplotou určenou z výsledku simulace je teplota 124,4 °C, kterou lze změřit na proudovodných dráhách NN průchodek. Nejnižší teplota 48,5 °C byla dosažena na porcelánovém izolátoru NN průchodky, která je nezatížena elektrickým proudem, neboť se přes ni uzavírají všechny tři fázové proudy a jejich vektorový součet je v případě symetrického napájení roven 0. Maximální teplota na výřezu z oceli S235JR je 107 °C a byla dosažena v okolí otvoru pro prostřední fázovou NN průchodku. Tato teplota je již podle výrobní dokumentace NN průchodky [22] nad dovolenou mezí, neboť se nedoporučuje dlouhodobě vystavovat NN průchodku teplotám vyšším než je 100° C.



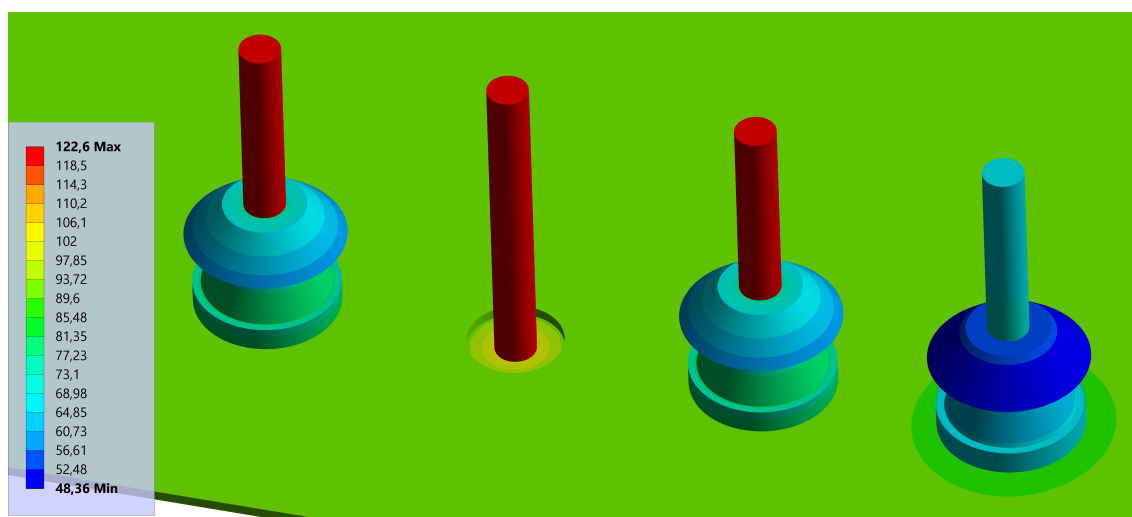
Obr. 7.5: Horní pohled na oteplení víka při zátěži s výřezem z oceli S235JR



Obr. 7.6: Dolní pohled na oteplení víka při zátěži s výřezem z oceli S235JR

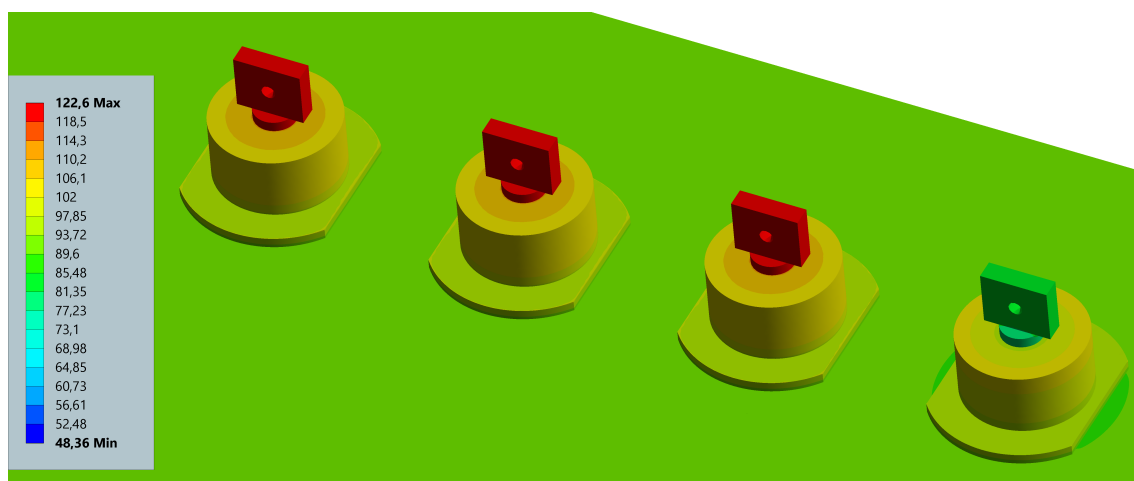
7.4 Tepelná analýza víka transformátoru s výřezem z nerezové oceli AISI 304

U této tepelné analýzy byl použit totožný model i se stejným nastavením simulace, jako v kapitole 7.3. Jediné provedené změny byly změny materiálu výřezu na nerezovou nemagnetickou ocel AISI 304. V tomto materiálu nevznikají vířivými proudy téměř žádné ohmické ztráty, jak se zmiňuje v kapitole 5.2, a proto ve výřezu nebyl nastavený žádný zdroj vnitřního tepla. Ohmické ztráty v proudovodných dráhách ovšem vznikají i v této analýze a proto jejich zdroje vnitřního tepla byly opět nastaveny podle výpočtu (7.5). Na Obr. 7.7 a 7.8 lze vidět výsledné oteplení modelu při zatížení transformátoru. Oteplení víka s výřezem z nerezové oceli AISI 304 je menší než u víka bez tohoto výřezu, zobrazeného na Obr. 7.5.



Obr. 7.7: Horní pohled na oteplení víka při zátěži s výřezem z nerezové oceli AISI 304

Maximální teplota víka byla při této analýze 91,1 °C a byla dosažena v blízkosti otvoru pro prostřední fázovou NN průchodku. Při této teplotě je již možné provozovat NN průchodku podle [22] dlouhodobě, neboť maximální dovolená teplota NN průchodky je 100° C. Nejnižší teplota víka byla 89,1 °C a byla dosažena v blízkosti otvoru pro nulovou NN průchodku, tudíž lze tvrdit, že víko odvádí teplo rovnoměrně. Maximální teplota v celém 3D modelu byla opět určena na proudovodných drahách a ukazuje teplotu 122,6 °C. Nejnižší dosaženou teplotu v celkovém 3D modelu 48,4 °C lze opět najít na porcelánovém izolátoru nulové průchodky.



Obr. 7.8: Dolní pohled na oteplení víka při zátěži s výřezem z nerezové oceli AISI 304

Závěr

V kapitole 1 je stručně popsán současný postup výroby olejových distribučních transformátorů v závodech podle nejmodernějších technologií a postupů.

V další kapitole 2, zaměřené na transformátorové průchodky, jsou zmíněny jejich základní parametry a porovnání různých typů průchodek podle použitého izolačního materiálu a způsobu připojení. Poslední dobou častěji používané epoxidové pásovinové NN průchodky mají výhodu v jednoduchosti výroby, nízké ceně a odolnosti oproti porcelánovým průchodkám. Podkapitola o těsnění pod průchodkami 2.3 je opět věnována používaným materiálům a jejich nejčastější příčině poruchy, jež je vysoká teplota způsobující stárnutí a praskání těsnění.

Následující kapitola 3 je zaměřena na vznik ztrát vířivými proudy, jež vznikají ve víku díky působení magnetického pole vzniklého vysokými proudy tekoucími NN průchodkami. V navazující podkapitole 3.2 je z Maxwellových a materiálových rovnic odvozen vztah určující hloubku vniku, na kterou navázala podkapitola 3.3 o tomto klíčovém parametru analýzy vířivých proudů. Dále v podkapitole 3.4 jsou podrobně vysvětlené oblasti magnetizační křivky různých skupin látek spolu s relativní permeabilitou materiálu. Použitím výřezu z nerezové oceli v oblasti NN průchodek docílíme snížení ztrát způsobenými vířivými proudy na zanedbatelnou hodnotu. Další podkapitola 3.5 pojednává o vzniku magnetické indukce v okolí vodiče, kterým protéká elektrický proud, a uvádí vzorec pro výpočet intenzity magnetického pole v okolí vodiče.

V kapitole 4 je popis 3D modelu víka a NN porcelánových průchodek pro 1 kV / 630 A, které se nacházejí na skutečném distribučním transformátoru 400 kVA, s napěťovým převodem 22/0,4 kV, a jsou provedené základní výpočty pro nastavení elektromagnetické simulace víka vířivými proudy.

V následující kapitole 5 je podrobně vysvětlené nastavení elektromagnetické simulace s veškerými zjednodušujícími předpoklady. Analyzovaný 3D model je kvůli zefektivnění výpočtu díky symetrii zjednodušený do čtvrtiny. Výsledné ohmické ztráty vířivými proudy ve výřezu z oceli S235JR dosáhly hodnoty 16,86 W ve zjednodušeném čtvrtinovém modelu, tudíž v celém výřezu dosáhly hodnoty 67,44 W při plném výkonu transformátoru. Nejvíce tepelně namáhanou částí víka je okolí otvoru pro prostřední fázovou NN průchodku. V další elektromagnetické simulaci se analyzoval výřez z nerezové nemagnetické oceli AISI 304. Ovšem v tomto případě nevznikají ve výřezu téměř žádné ohmické ztráty vířivými proudy.

Následující 6 kapitola je rešerší na různé formy sdílení tepla. V dalších kapitolách jsou vysvětlené součinitele přestupu tepla a následně jsou vypočítané veškeré součinitele přestupu tepla na NN průchodce. Tyto koeficienty určují, jak dobře se na rozhraní určitých materiálů potřebných pro tepelnou analýzu šíří teplo.

Poslední kapitolou 7 je tepelná analýza oteplení víka při plném zatížení transformátoru. Ohmické ztráty ve víku z oceli S235JR, zjištěné v kapitole 5.1, jsou do tohoto modelu implementované jako zdroje vnitřního tepla společně s Jouleovými ztrátami vznikající v proudovodných dráhách NN průchodek. Výsledné oteplení výřezu pod těsněním dosahuje maximální teploty 107 °C. Následná tepelná analýza s výřezem z nerezové nemagnetické oceli AISI 304 ukazuje maximální teplotu ve stejném místě pouze 91,1 °C. Tento teplotní rozdíl přes 15 °C již může způsobovat zrychlené stárnutí pryžového těsnění pod NN průchodkou, které se doporučuje nezatěžovat větší teplotou než 100° C.

Snahou této bakalářské práce je monitorovat mez výkonu transformátoru, u kterého je již nutné využít víko opatřené nerezovým výřezem v okolí NN průchodek, aby nedocházelo k přehřívání víka v okolí NN průchodek způsobeného vířivými proudy a k postupnému praskání těsnění pod NN průchodkou. Nejefektivnější z ekonomického hlediska je nerezový výřez přidávat pouze na transformátory s výkonem větším, než je tato mez. Výslednou teplotu víka pod těsněním nelze přesně určit, neboť velice závisí na zatížení transformátoru, součinitelích určených pomocí skutečné oteplovací zkoušky a vlastnostech materiálů. Lze ale tvrdit, že použitím výřezu z nemagnetického materiálu dojde k radikálnímu zamezení vzniku těchto ztrát. Lze také říct, že olejový distribuční transformátor o výkonu 400 kVA s napětovým převodem 22/0,4 kV nelze provozovat pouze s transformátorovým víkem z oceli S235JR, neboť teplota víka pod těsněním NN průchodky dosahuje 107° C, což už je nad dovolenou mezí.

Literatura

- [1] Mrajca, M.: Návrh olejového distribučního transformátoru. 2021. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/197375>
- [2] Ayat, S.; Wrobel, R.; Baker, J.; aj.: A comparative study between aluminium and copper windings for a modular-wound IPM electric machine. In *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 2017, s. 1–8, doi:10.1109/IEMDC.2017.8002010.
- [3] Aluminum vs. copper in distribution transformers. Accessed: 2022-11-1. Dostupné z: <https://www.maddoxtransformer.com/resources/articles/aluminum-vs-copper-in-distribution-transformers>
- [4] Mrajca, M.: Olejové transformátory. *Energie kolem nás*, 2011: s. 10–11. Dostupné z: <https://www.elpro-energo.cz/download/clanky-v-tisku/olejove-transformatory-2011.pdf>
- [5] Amirbandeh, M.; Yaghoti, A.; Sharifi-Tameh, G.-R.: The Investigation of Replacing Ceramic Bushings with Silicon Bushings in the Distribution Transformers. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, ročník 04, 01 2014: s. 319–325, doi:10.4236/jsemat.2014.46035.
- [6] Li, S.; Ke, Y.; Xie, L.; aj.: Study on the aging of three typical rubber materials under high- and low-temperature cyclic environment. *e-Polymers*, ročník 23, 02 2023: str. 20228089, doi:10.1515/epoly-2022-8089.
- [7] Strmiska, T.: Návrh magnetického obvodu rychlého magnetoreologického tlumiče bez použití feritů. 2017. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=147064
- [8] Kulkarni, S. V.; Khaparde, S. A.: *Transformer engineering*. Boca Raton: CRC Press, druhé vydání, c2013, ISBN 978-1-4398-5377-1.
- [9] Slovník pojmů. Dostupné z: <https://www.radio.feec.vutbr.cz/raida/multimedia/index.php?nav=A-5>
- [10] Sukhon, R.; Kongchana, R.; Khongsiri, K.; aj.: A study on volumetric magnetic susceptibility of weight due to its manufacturing process. 11 2010.
- [11] Malý, M.: Magnetické pole. Dostupné z: https://physics.ujep.cz/~mmaly/vyuka/poc_fyz_1/ISING/Ising/05_Magneticke_pole.pdf

- [12] Mudruňková, A.: *Elektrotechnické materiály I*. 2016. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/197375>
- [13] What are magnetic fields? Dostupné z: <https://www.khanacademy.org/science/physics/magnetic-forces-and-magnetic-fields/magnetic-field-current-carrying-wire/a/what-are-magnetic-fields>
- [14] Měrka, I.; Vyroubal, P.: Výpočet teplotního pole přípojnicového mostu. 2016. Dostupné z: <https://dspace.vut.cz/items/30203551-c518-4edf-8315-4511c7e5987e>
- [15] Mlýnek, J.: Matematické modely vedení tepla v elektrických strojích. 2007. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/38867>
- [16] Hradílek, Z.; Lázníčková, I.; Král, V.: *Elektrotepelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, vyd. 1 vydání, 2011, ISBN 978-80-01-04938-9.
- [17] Hasal, P.; Schreiber, I.; Šnita, D.: *Chemické inženýrství I*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, vyd. 2., přeprac. vydání, 2007, ISBN 978-80-7080-629-6.
- [18] Súkeník, J.: Tepelný model synchronního motoru s permanentními magnety s přímým připojením na síť. 2023. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/209962>
- [19] Wang, H.; Ma, S.; Yu, H.; aj.: Thermal Conductivity of Transformer Oil From 253 K to 363 K. *Petroleum Science and Technology*, ročník 32, 09 2014, doi: 10.1080/10916466.2012.757235.
- [20] Hak, J.; Ošlejšek, O.: *Výpočet chlazení elektrických strojů*. Brno: Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých, první vydání, 1973.
- [21] Çengel, Y. A.; Ghajar, A. J.; Kanoglu, M.: *Heat and mass transfer*. New York: McGraw-Hill Education, fifth edition in si units vydání, 2015, ISBN 9789814595278, 546-547 s.
- [22] PORCELAIN BUSHINGS LV Series. 2022. Dostupné z: https://www.reinhausen.com/fileadmin/downloadcenter/products/bushing/porcelain/cedaspe_lv/cedaspe_lv-full-catalogue.pdf

Seznam symbolů a zkratek

VN	vysoké napětí
NN	nízké napětí
ČSN	Československá norma
RAL	standard pro stupnici barevných odstínů
DMCR	Detekční, měřicí a kontrolní relé
AISI	American Iron and Steel Institute
H	vektor intenzity magnetického pole
B	vektor magnetické indukce
E	vektor intenzity elektrického pole
D	vektor elektrické indukce
J	vektor proudové hustoty
ρ	objemová hustota volných nábojů
σ	elektrická vodivost materiálu
μ	absolutní permeabilita materiálu
μ_0	permeabilita vakua
μ_r	relativní permeabilita materiálu
ϵ	elektrická permitivita materiálu
ω	úhlová frekvence
γ	konstanta šíření
α	měrný útlum
β	měrná fáze
j	imaginární jednotka
z	osa z
e	Eulerovo číslo

δ	hloubka vniku
δ_{ocel}	hloubka vniku oceli S235JR
∇	diferenciální operátor rotace
J_x	proudová hustota v axiálním směru
E_x	elektrická intenzita v axiálním směru
E_{xp}	amplituda elektrické intenzity v axiálním směru
d	vzdálenost od osy vodiče
I	elektrický proud
a_j	a jiné
I_{ef}	efektivní hodnota elektrického proudu
S_t	zdánlivý výkon transformátoru
U_s	sdružená hodnota napětí
I_{max}	amplituda elektrického proudu
H_{max}	amplituda intenzity magnetického pole
B_{max}	amplituda magnetické indukce
Q	teplo
R	tepelný odpor
α	součinitel přestupu tepla
A	teplosměnná plocha
τ	čas tepelné výměny
Δ_t	rozdíl teplot dvou látek
α_t	součinitel přestupu tepla těsněním
L	tloušťka odporové vrstvy
λ	součinitel tepelné vodivosti
k_t	součinitel stykového odporu těsnění

k_{t1}	součinitel stykového odporu těsnění na prvním rozhraní
k_{t2}	součinitel stykového odporu těsnění na druhém rozhraní
R_{st}	stykový odpor
S	plocha kontaktu
α_{tcelk}	celkový součinitel přestupu tepla těsněním
α_o	součinitel přestupu tepla olejem
λ_o	součinitel tepelné vodivosti oleje
α_{kv1}	součinitel přestupu tepla konvekcí vzduchu
α_{kv}	skutečný součinitel přestupu tepla konvekcí vzduchu
t	rozdíl teplot povrchu víka transformátoru a okolního vzduchu
L_c	charakteristická délka víka
L_v	délka víka
T_f	teplota filmu
T_s	odhadovaná teplota víka
T_∞	teplota oleje
g	tíhové zrychlení
v	rychlost proudícího oleje
Pr	Prandtlovo číslo
Ra	Rayleighovo číslo
Nu	Nusseltovo číslo
α_{ko}	součinitel přestupu tepla konvekcí olejem
ρ_0	rezistivita mosazi při nominální teplotě
ρ_m	rezistivita mosazi při přepočítané teplotě
α_m	teplotní součinitel elektrického odporu mosazi
ΔP_v	ohmické ztráty ve čtvrtinovém modelu výřezu

V_v	objem čtvrtinového modelu výřezu
p_v	měrné ohmické ztráty ve výřezu
p_m	měrné ohmické ztráty v proudovodných dráhách NN průchodek
ΔP	ohmické ztráty ve vodiči
l	délka vodiče
ΔP_m	ohmické ztráty v proudovodných dráhách NN průchodek
V_m	objem proudovodných drah NN průchodek
S_m	průřez proudovodných drah NN průchodek
l_m	délka proudovodných drah NN průchodek
R_m	elektrický odpor proudovodných drah NN průchodek