

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh třífázového transformátoru

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Josef MOTYKA**
Osobní číslo: **E13B0283P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Návrh třífázového transformátoru**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište možnosti konstrukčního uspořádání transformátorů.
2. Proveďte elektromagnetický návrh třífázového transformátoru dle zadání vedoucího práce.
3. Ve vybraném CAD systému vytvořte parametrický 3D model zadaného transformátoru.
4. Na základě tohoto modelu vytvořte rozměrový výkres.
5. Porovnejte hmotnosti vinutí a magnetického obvodu vypočtené v bodu 1 s hmotnostmi získanými analýzou v bodu 3.




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

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

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Šobra**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky
Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Anotace

Bakalářská práce je zaměřena především na výpočet a návrh třífázového transformátoru. Vytvoření 3D modelu a rozměrového výkresu pomocí CAD systému. Dále pojednává o možnostech konstrukčního uspořádání transformátorů.

Klíčová slova

třífázový transformátor, vinutí, magnetický obvod, elektromagnetický návrh, 3D model

Abstract

The main subject of the bachelor thesis is calculation, design of three-phase transformer and creation of 3D model and dimension drawing by CAD system. The work is also focused on possibilities of constructive lay-out of transformers.

Key words

three-phase transformer, winding, magnetic circuit, electromagnetic design, 3D model

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 14.4.2015

Josef Motyka

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Šobrovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| OBSAH | 8 |
| SEZNAM SYMBOLŮ A ZNAČEK | 9 |
| ÚVOD | 11 |
| 1 MAGNETICKÝ OBVOD | 12 |
| 1.1 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ MAGNETICKÉHO OBVODU..... | 12 |
| 1.2 KONSTRUKCE MAGNETICKÉHO OBVODU | 16 |
| 2 VINUTÍ | 18 |
| 2.1 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ VINUTÍ..... | 18 |
| 2.2 KONSTRUKCE VINUTÍ | 22 |
| 3 TVARY NÁDOB | 24 |
| 4 ZPŮSOBY CHLAZENÍ | 27 |
| 5 VÝPOČET | 29 |
| 6 3D MODEL | 36 |
| 7 ROZMĚROVÝ VÝKRES | 37 |
| ZÁVĚR | 40 |
| SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ | 42 |

Seznam symbolů a zkratk

| | |
|-----------------------|---------------------------------------|
| B | Magnetická indukce $[T]$ |
| $\cos \varphi$ | Účinník |
| f | Frekvence $[Hz]$ |
| I | Elektrický proud $[A]$ |
| I_{lk} | Proud nakrátko $[A]$ |
| m | Počet fází |
| m_x | Hmotnost $[kg]$ |
| N | Počet závitů vinutí |
| n_v | Počet vrstev ve vinutí |
| n_k | Počet prostřídání paralelních vodičů |
| p_N | Převod závitů |
| p_U | Napětový převod |
| R | Elektrický odpor $[\Omega]$ |
| S | Jmenovitý výkon transformátoru $[VA]$ |
| S_x | Obsah plochy $[m^2]$ |
| U | Elektrické napětí $[V]$ |
| u_k | Procentní napětí nakrátko $[\%]$ |
| x | Vzdálenosti, rozměry $[m]$ |
| X | Reaktance $[\Omega]$ |
| Z | Impedance $[\Omega]$ |
| Δp | Chyba převodu |
| ΔP_{Fe} | Ztráty v železe $[W]$ |
| ΔP_j | Joulovy ztráty ve vinutí $[W]$ |
| η | Účinnost $[\%]$ |

| | |
|----------------|---|
| ρ | Měrný elektrický odpor $[\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}]$ |
| J | Proudová hustota $[A \cdot mm^{-2}]$ |
| γ | Hustota $[kg \cdot m^{-3}]$ |
| ϕ | Magnetický tok $[Wb]$ |
| U_{in} | Indukované napětí $[V]$ |
| k_{Fe} | Činitel plnění železa |
| c | Konstanta pro olejem chlazený transformátor |
| k | Konstanta pro třífázový jádrový transformátor |
| N_v | Počet vodičů ve vrstvě |
| s_{vv} | Vertikální volnost vinutí |
| s_{vh} | Horizontální volnost vinutí |
| U_k | Napětí nakrátko $[V]$ |
| p_{Fe} | Měrný ztrátový výkon $[W \cdot kg^{-1}]$ |
| A | Proudové zatížení železa $[A \cdot m^{-1}]$ |
| V_{iz} | Objem izolace $[m^3]$ |

Úvod

Transformátor je elektrický stroj pracující na principu elektromagnetické indukce. Účelem transformátorů je měnit (transformovat) parametry některých elektrických veličin na jiné, přitom forma energie na vstupu i výstupu zůstává vždy elektrická. Nejčastěji transformované veličiny jsou napětí a proud. Tato změna se realizuje bez dodávání mechanické energie.

Transformátory se dnes používají v mnoha oblastech, od elektroniky až po silnoproudé rozvody. Výkony transformátorů se pohybují od zlomků VA do stovek MVA. Transformátory mohou být jednofázové, třífázové nebo vícefázové.

Jednofázové transformátory jsou většinou transformátory malých výkonů. Jejich úkolem je obvykle transformace směrem dolů, tedy na nižší napětí. Uplatňují se například v domácích spotřebičích.

Pro přenos velkých výkonů v energetických sítích se používají třífázové transformátory, které transformují poměrně malé napětí generátoru na velmi vysoké napětí, které je z hlediska hospodárnosti vhodné pro dálkový přenos elektrické energie a na místě spotřeby opět transformují na napětí nižší, vhodné pro distribuční soustavu. Třífázový transformátor si můžeme jednoduše představit jako spojení tří stejných transformátorů jednofázových. Jejich vinutí mohou být spojena do hvězdy, do trojúhelníka nebo do lomené hvězdy. Místo tří samostatných jednofázových transformátorů používáme třífázový transformátor rovinný se třemi jádry, tzn. mající vstupní i výstupní vinutí každé fáze na jednom sloupku jádra. Třífázové transformátory se vesměs konstruují jako jádrové.

Mezi výhody tohoto stroje patří jeho jednoduchý provoz, spolehlivost a nízká náročnost na obsluhu i údržbu oproti strojům točivým. [1][4]

Na začátku této práce je popsána konstrukce magnetického obvodu a vinutí transformátorů. Dále práce pojednává o nádobách a možnostech chlazení transformátorů. V následující části je proveden výpočetní návrh magnetického obvodu a vinutí transformátoru, na jehož základě byl dále vytvořen parametrický 3D model navrhnutého transformátoru. Z tohoto modelu byl poté vytvořen rozměrový výkres magnetického obvodu a vinutí. Závěr této bakalářské práce je zaměřen na porovnání hmotností magnetického obvodu a vinutí získaných výpočtem, a hmotností získaných pomocí návrhového systému.

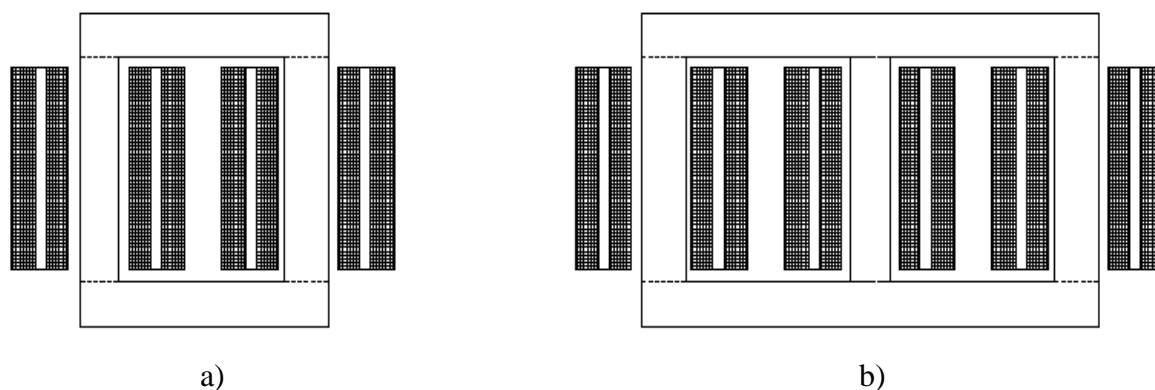
1 Magnetický obvod

1.1 Konstrukční uspořádání magnetického obvodu

Zásadně se rozlišují dva typy magnetických obvodů transformátoru: jádrový a plášťový. Níže popsané konstrukce jádrových a plášťových magnetických obvodů mají osy jader i spojky v jedné rovině. Zřídka se můžeme setkat s prostorovými magnetickými obvody, v nichž osy jader neleží v jedné rovině, ovšem tyto magnetické obvody se dnes téměř nepoužívají. Z hlediska konstrukčního uspořádání magnetického obvodu lze ještě zmínit transformátory toroidní. Tyto transformátory však mají využití spíše v elektronice, tudíž nejsou dále popisovány.

Jádrový typ magnetického obvodu

V případě jednofázového jádrového transformátoru je magnetický obvod tvořen dvěma jádry, která jsou magneticky spojena pomocí dvou spojek (obr. 1a). U třífázového jádrového transformátoru připadá každé fázi jedno jádro. Jednotlivá jádra jsou opět magneticky spojena pomocí spojek (obr. 1b).



Obr. 1: Konstrukční schéma jádrového transformátoru - a) jednofázový, b) třífázový

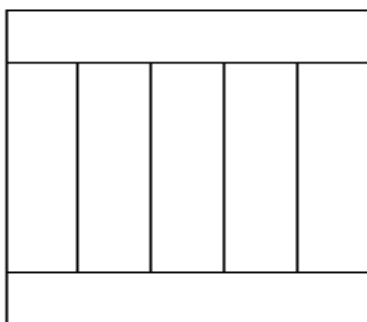
Převzato z [3]

Magnetické obvody jádrových transformátorů se skládají z izolovaných elektrotechnických plechů.

Způsoby skládání plechů jsou:

1. Jádra a spojky magnetického obvodu spojeny natupo (obr. 2).
2. Přeplátovaný magnetický obvod pod úhlem 90° (obr. 3).
3. Přeplátovaný magnetický obvod pod úhlem 45° (obr. 4).
4. Navíjený magnetický obvod (obr. 5).
5. Dvourámový magnetický obvod (obr. 6).

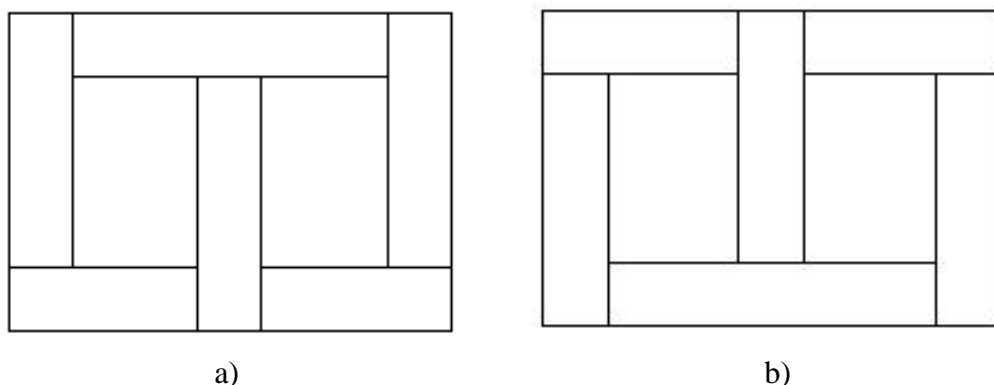
V případě spojení natupo se jádra a spojky skládají samostatně a poté se spojují v jeden obvod pomocí vertikálních stahovacích svorníků. Výhodou tohoto způsobu je poměrně jednoduchá montáž a demontáž magnetického obvodu a vinutí. Podstatným nedostatkem však může být vznik značných vířivých proudů způsobených tím, že v překrytí plechů spojky a jádra se směr magnetických siločar nekryje se směrem válcování. Jelikož vířivé proudy vytvářejí dodatečné ztráty, které způsobují ohřátí železa, vkládají se mezi spojky a jádra tenké izolační vložky z teplovodního materiálu. To však vede ke zvýšení magnetizačního proudu transformátoru. Proto se konstrukce magnetických obvodů spojených natupo používá jen zřídka. [3]



Obr. 2: Jádra a spojky magnetického obvodu třífázového transformátoru spojeny natupo

Převzato z [3]

V přeplátovaných magnetických obvodech pod úhlem 90° se jádra i spojky skládají součastně, aby vytvořily uzavřený obvod. Po složení magnetického obvodu se horní spojka vyjme, na jádra se umístí vinutí a pak se plechy spojky opět zasunou na původní místo. V místech spojení jader a spojek vzniká také úbytek magnetického napětí a dodatečné ztráty v železe, jsou však podstatně menší než u obvodů spojených natupo. [3]

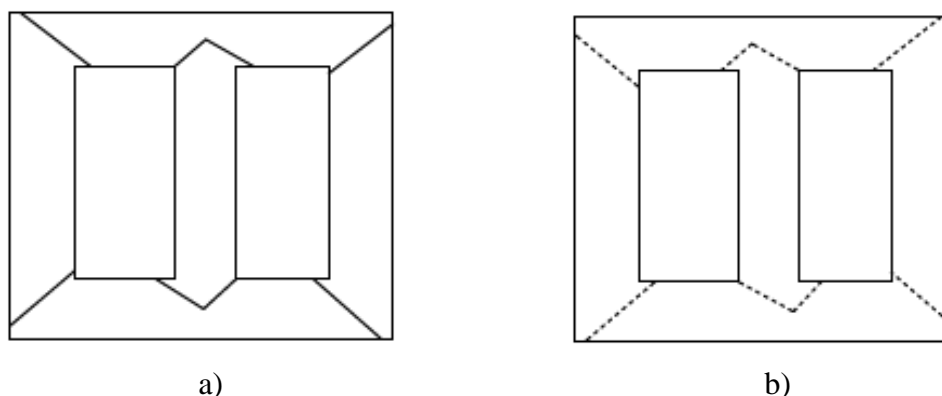


Obr. 3: Přeplátovaný magnetický obvod pod úhlem 90° - a) liché vrstvy, b) sudé vrstvy

Převzato z [3]

Částečného odstranění nežádoucích ztrát v železe a úbytku magnetického napětí můžeme docílit použitím přeplátovaného magnetického obvodu pod úhlem 45° .

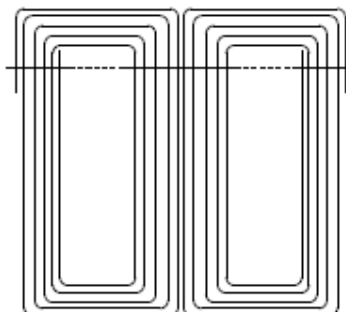
Z technického hlediska výroby je tato konstrukce složitější a ekonomicky náročnější, avšak dnes velmi používaná pro výrobu distribučních transformátorů. Používá se vzájemné skládání plechů po skupinách, případně metodou step-lap.



Obr. 4: Překládaný magnetický obvod pod úhlem 45° - a) liché vrstvy, b) sudé vrstvy

Převzato z [3]

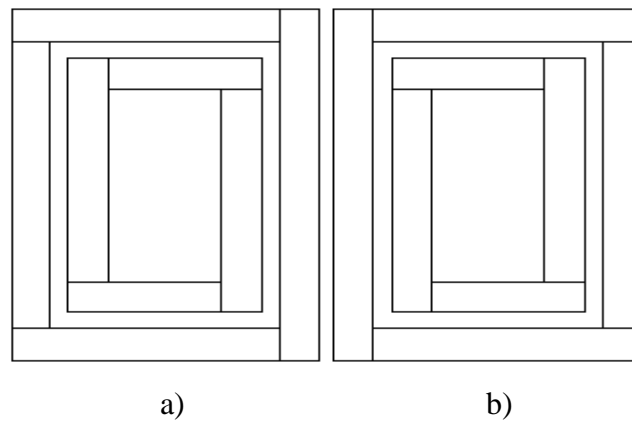
Dalším konstrukčním řešením je navíjený magnetický obvod. Směr magnetických siločar tohoto obvodu je po celém obvodu totožný se směrem válcování. Potíže však přináší umístění vinutí na tento magnetický obvod. Aby bylo možné nasadit vinutí, musí se jádro přeříznout. Po nasazení vinutí se před opětovným spojením jádra odstraní vzniklé otřepty a mezi jednotlivé části se vloží tenká izolační folie. [3]



Obr. 5: Navíjený magnetický obvod

Převzato z [3]

Pro transformátory velkých výkonů se využívá konstrukce dvourámového magnetického obvodu. Dochází tak k ulehčení zaplechování a rozplechování vrchní spojky. Toto řešení umožňuje také lepší chlazení, jelikož vzdálenost od nejteplejších vnitřních míst k povrchu, který je omýván olejem se dvakrát zmenší. [3]



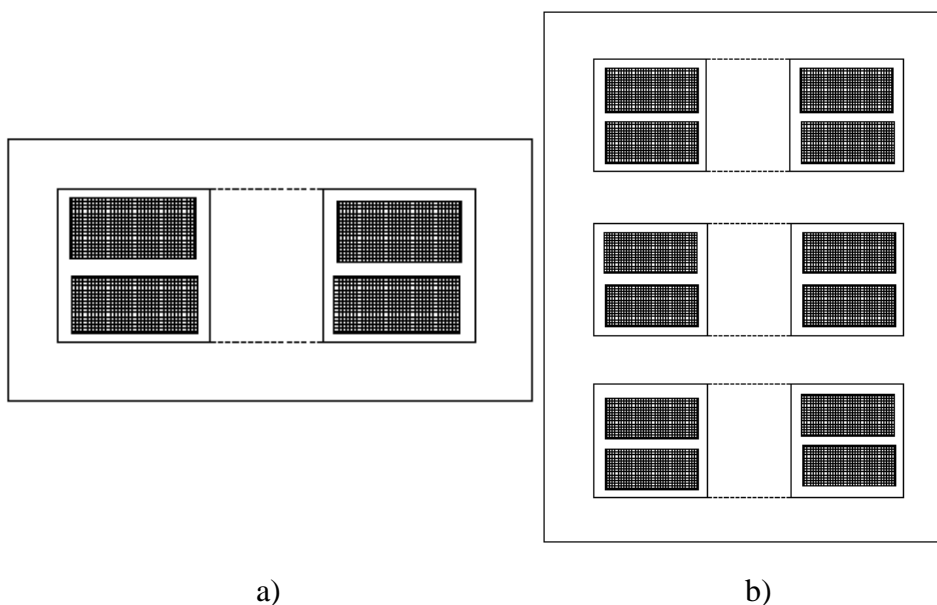
Obr. 6: Dvourámový magnetický obvod - a) liché vrstvy, b) sudé vrstvy

Převzato z [3]

Plášťový typ magnetického obvodu

Jednofázové plášťové transformátory mají rozvětvený magnetický obvod, který částečně zakrývá vinutí. Magnetický tok ve středním jádru je dvakrát větší než v jádrech vedlejších. Vedlejší jádra tak mohou mít poloviční průřez (obr. 7a).

Třífázový plášťový transformátor je v podstatě tvořen třemi jednofázovými plášťovými transformátory, které jsou postaveny vedle sebe. Vinutí jednotlivých fází je zapojeno tak, aby součet fázových toků ve spojkách magnetického obvodu nezvětšoval celkový magnetický tok. Střední fáze má proto zapojeno vstupní i výstupní vinutí obráceně (obr. 7b). [3]



Obr. 7: Konstrukční schéma plášťového transformátoru - a) jednofázový, b) třífázový

Převzato z [3]

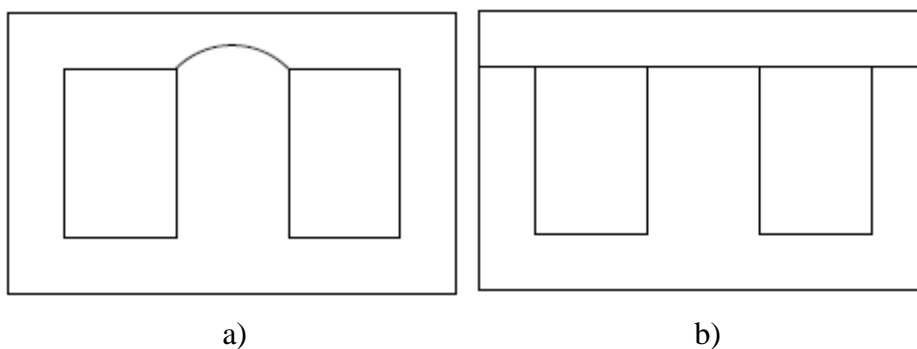
Magnetické obvody plášťových transformátorů se skládají z izolovaných elektrotechnických plechů.

Způsoby skládání plechů jsou:

1. Magnetický obvod z plechů typu EI (obr. 8a).
2. Magnetický obvod z plechů typu M (obr. 8b).

Plášťové transformátory se používají spíše pro menší výkony. Pro větší výkony jsou převážně používány již zmíněné jádrové typy transformátorů. Plášťové transformátory mohou mít magnetický obvod složený z jednotlivých elektrotechnických plechů podobných jako u jádrových transformátorů, častěji jsou však jádra složená z plechů typu EI, případně z plechů typu M.

Magnetický obvod plášťových transformátorů se sestavuje plech po plechu tak, že plechy se navlékají na již zhotovené cívky a to střídavě, aby spára byla v jedné vrstvě nahoře a v druhé dole.



Obr. 8: Transformátorové plechy – a) typ M, b) typ EI

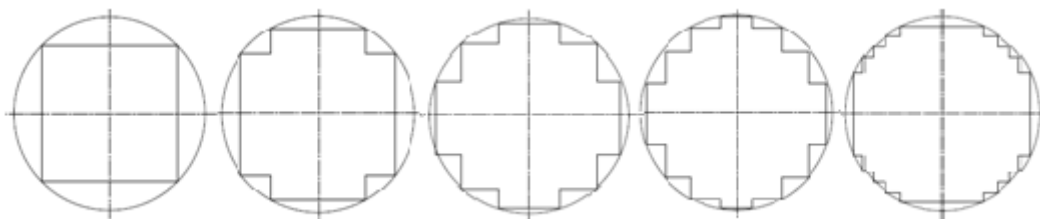
Převzato z [3]

1.2 Konstrukce magnetického obvodu

Magnetický obvod je konstruován z transformátorových plechů válcovaných za tepla, nebo za studena. Výhodou plechů válcovaných za tepla je nižší cena, stálost ztrát při zpracování i během provozu. Nevýhodou je poměrně velká spotřeba energie v magnetickém obvodu a omezení horní hranice magnetické indukce na 1,5 T. Výhodou plechů válcovaných za studena je malá spotřeba energie v magnetickém obvodu, malé ztráty a horní hranice magnetické indukce okolo 1,7 T.

Jádra magnetických obvodů se provádějí s kruhovým a čtyřhranným tvarem. U jádrových transformátorů se používá obvykle průřez jádra kruhový, u plášťových pak spíše tvar čtyřhranný. Kruhové průřezy se nahrazují stupňovitými, jejich výroba je jednodušší a

levnější (obr. 9). Se zvětšujícím se průměrem jádra se zvyšuje i počet stupňů. [3]



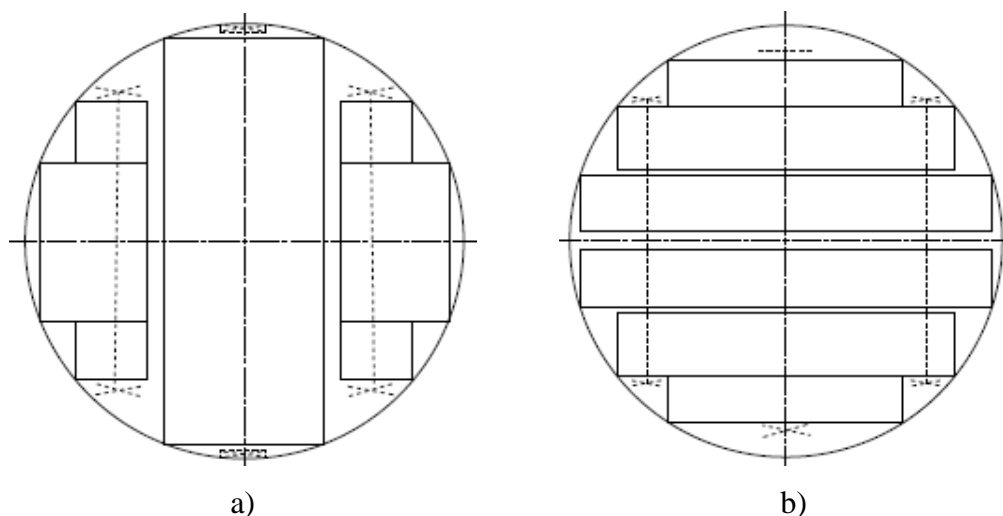
Obr. 9: Jednotlivé stupně jádra

Převzato z [1]

Jádro je rozděleno stupni na jednotlivé svazky, mezi kterými mohou být při větších průřezech jádra chladicí kanály, které jsou rovnoběžně podélné s vrstvami (obr. 10a) nebo příčné (obr. 10b). Příčné kanály jsou mnohem méně účinné, protože teplo se k povrchu dostává přes železo a izolaci mezi plechy, zatímco u kanálů podélných se vede teplo pouze železem. Podélné kanály jsou však mnohem složitější na výrobu než příčné, proto se příčné kanály využívají častěji.

Průřez spojky je možné konstruovat pro zjednodušení čtyřhranný nebo s malým počtem stupňů, přičemž každý svazek a podélný kanál jádra se spojuje s odpovídajícím svazkem a kanálem spojky. Průřez svazků v jádrech a spojkách se volí tak, aby indukce v jádru byla rovnoměrně rozložena.

Plechý tvořící magnetický obvod musí být staženy dostatečně velkou silou, aby nedocházelo při provozu k příliš velkému hluku. Dříve se svazky jader stahovaly ocelovými svorníky. V současné době se používají tzv. bezsvorníkové konstrukce, kde se jádra, a většinou i spojky, stahují bandážemi z umělých hmot nebo ze skelných pásků. [3]



Obr. 10: Jádra transformátoru s chladicími kanály - a) podélné, b) příčné

Převzato z [3]

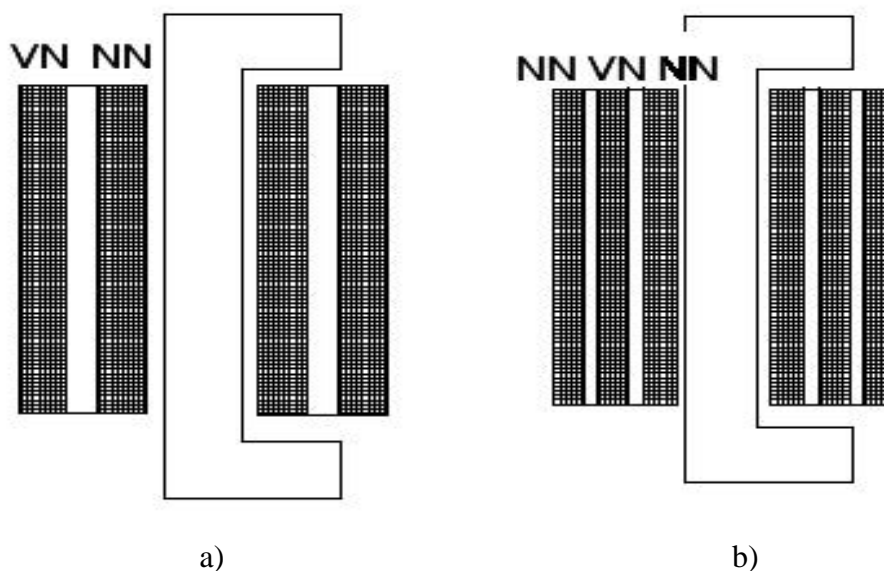
2 Vinutí

2.1 Konstrukční uspořádání vinutí

V případě jednofázového jádrového transformátoru je nejčastěji sekundární i primární vinutí rozděleno na dvě části, přičemž každá část náleží jednomu jádru magnetického obvodu. Konce těchto vinutí bývají spojeny sériově nebo paralelně. V třífázovém jádrovém transformátoru připadá každé fázi jedno jádro, a tudíž na každém jádře je umístěno vinutí jedné fáze. Konce těchto tří vinutí jsou spojeny do hvězdy, trojúhelníka nebo lomené hvězdy.

Podle vzájemné polohy vinutí vyššího a nižšího napětí, a podle jejich umístění na jádrech transformátoru, rozlišujeme vinutí na sousá a prostřídaná.

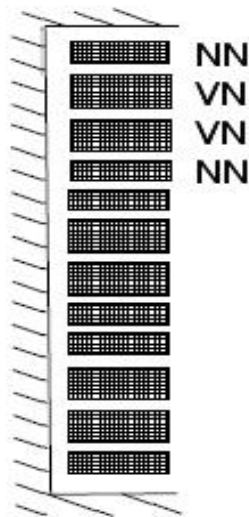
Vinutí sousá se na jádru umísťují tak, že jejich osa je shodná s osou jádra. Blíže k jádru se umísťuje obvykle vinutí nižšího napětí, jelikož není potřeba tak silné izolace proti jádru jako u vinutí vyššího napětí. Vinutí vyššího napětí je poté umístěno vně vinutí nižšího napětí (obr. 11a). Někdy může být použito dělené sousé vinutí. V tomto případě je vinutí nižšího napětí rozděleno na dvě části a vinutí vyššího napětí je umístěno mezi tyto části (obr. 11b). [1]



Obr. 11: Sousé vinutí - a) jednoduché, b) dělené

Převzato z [2]

U prostřídaného vinutí se střídají části vinutí nižšího a vyššího napětí ve směru jejich společné osy. Celé vinutí se rozdělí na skupiny skládající se z jedné nebo několika cívek vyššího napětí umístěných mezi dvěma nebo více cívkami nižšího napětí (obr. 12). [1]



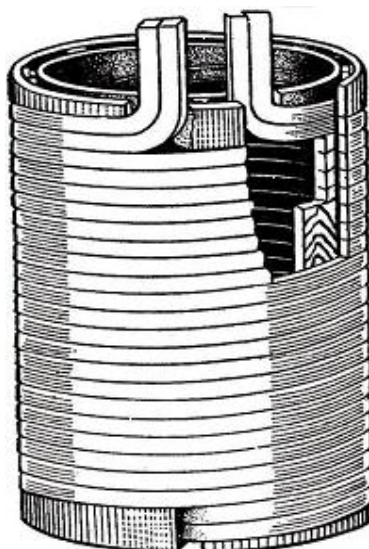
Obr. 12: Prostřídaná vinutí

Převzato z [2]

Z hlediska konstrukčního uspořádání můžeme souosá vinutí rozdělit na:

1. Jednovrstvé a dvouvrstvé vinutí (obr. 13).
2. Jednoduché vinutí s více paralelními vodiči vinutými v jednochodé nebo vícechodé šroubovici.
3. Mnohovrstvové vinutí (obr. 15).
4. Cívkové mnohovrstvové vinutí (obr. 16).
5. Plynulé cívkové vinutí (obr. 17).

Vinutí jednovrstvé a dvouvrstvé je navíjeno čtyřhrannými vodiči s vrstvami se stejným nebo opačným smyslem. Jsou snadno proveditelná, vzhledem k jejich radiálním rozměrům jsou ale málo mechanicky pevná proti osovým silám vznikajícím při zkratech. Používají se především pro vinutí nižšího napětí a do jmenovitých proudů 800A.[1]



Obr. 13: Souosé dvouvrstvé vinutí se dvěma paralelními vodiči

Převzato z [2]

Jednoosé vinutí s více paralelními vodiči vinutými v jednochodé nebo vícechodé šroubovici je vinuto z několika čtyřhranných vodičů. Pro rovnoměrné rozložení proudu mezi paralelními vodiči je nutné provést transpozici (obr. 14). Při transpozici provádíme prostřídání poloh vodičů tak, aby postupně prošly pokud možno všemi polohami společného vodiče. Tato vinutí mívají i přes 20 paralelních vodičů, jejichž transponování je provedeno v kanálech. Používají se pro nižší napětí při proudech větších než 300A. Jsou dostatečně mechanicky pevná, jelikož mají značné radiální rozměry. [1]

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| | | | | | |
| 3 | 2 | 1 | 6 | 5 | 4 |
| | | | | | |
| 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 |
| | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

a)

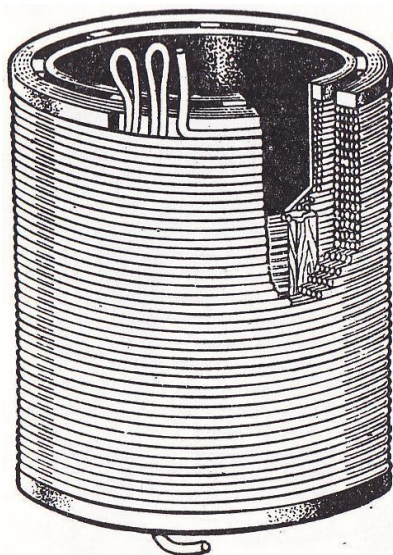
| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 8 | 7 | 6 | 5 |
| | | | |
| 8 | 1 | 2 | 3 |
| 7 | 6 | 5 | 4 |
| | | | |
| 7 | 8 | 1 | 2 |
| 6 | 5 | 4 | 3 |
| | | | |
| 6 | 7 | 8 | 1 |
| 5 | 4 | 3 | 2 |
| | | | |
| 5 | 6 | 7 | 8 |
| 4 | 3 | 2 | 1 |

b)

Obr. 14: Transpozice paralelních vodičů v závitech vinutí - a) neúplné, b) úplné

Převzato z [2]

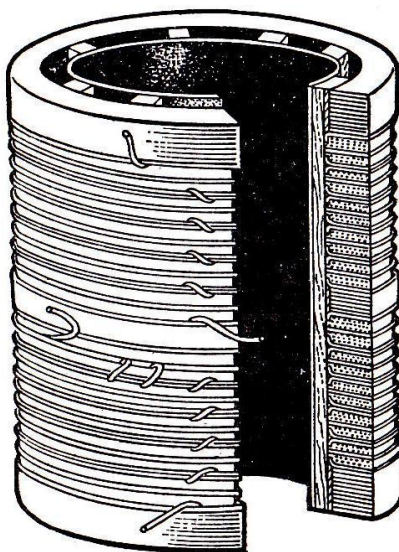
Mnohovrstvové vinutí se obvykle navíjí z vodičů kruhového průřezu, které je umístěno po celé délce jádra v několika vrstvách. Při větším počtu vrstev se vinutí rozdělí do dvou cívek, mezi které se v axiálním směru umísťuje chladicí kanál. Samotné vrstvy cívek jsou navzájem izolovány papírem. Toto vinutí je snadno proveditelné, ale proti osovým silám je málo pevné. Používá se pro napětí do 35kV, ale v případě použití čtyřhranných vodičů lze navrhnout i pro velmi vysoká napětí. [1]



Obr. 15: Mnohovrstvové vinutí s chladícím kanálem

Převzato z [2]

Cívkové mnohovrstvové vinutí se skládá z několika mnohovrstvových cívek spojených do série. Bývají navinuté z vodičů kruhového průřezu a jednotlivé vrstvy se izolují papírem. Vinutí je snadno proveditelné a používá se pro vyšší napětí. [1]



Obr. 16: Cívkové mnohovrstvové vinutí

Převzato z [2]

Plynulé cívkové vinutí je obtížně proveditelné, je však často používané pro vyšší i nižší napětí pro svou velkou mechanickou pevnost a provozní spolehlivost. Jsou navinuta ve spirále ze čtyřhranných vodičů ve formě několika desítek deskových cívek spojených bez pájení. V případě použití dvou či více paralelních vodičů je potřeba provést transpozici. [1]



Obr. 17: Plynulé cívkové vinutí

Převzato z [2]

2.2 Konstrukce vinutí

Z konstrukčního hlediska jsou možnosti vinutí velmi rozmanité. Konstrukční provedení vinutí závisí především na jmenovitém proudu a napětí transformátoru. Od velikosti jmenovitého proudu se odvíjí výběr průřezu vodiče a v případě potřeby také počet paralelních větví. Jmenovité napětí transformátoru ovlivňuje především druh a tloušťku izolace mezi jednotlivými závity, cívkami a vinutím.

Vodiče pro vinutí se vyrábějí s kruhovým nebo čtyřhranným průřezem. Je možné navíjet cívku několika paralelními vodiči najednou nebo použít, zejména u menších transformátorů, párovaný vodič. Párované vodiče jsou izolované a navzájem stočené, tím se však nevyužije prostor vinutí tak, jako u vinutí paralelního. Pro transformátory vyšších výkonů je potřeba použít klasické paralelní vodiče.

Jako izolační materiály se v transformátorech nejčastěji používají elektrotechnické laky, přírodní bavlna a umělá příze, přírodní a umělé hedvábí, skleněná vlákna, lepenka a elektrotechnický papír. Z hlediska materiálů používaných pro vinutí transformátorů je nejčastěji používána měď, ale můžeme se setkat i s vinutím z hliníkových vodičů, či z vodičů supravodivých. Mezi nejdůležitější vlastnosti mědi patří zejména vynikající elektrická a tepelná vodivost. Má také lepší mechanické vlastnosti než hliník. [2][3]

Vinutí transformátoru musí vyhovovat řadě důležitých kritérií. Mezi ně patří také následující základní požadavky:

1. Mechanická pevnost.
2. Elektrická pevnost.
3. Technologická proveditelnost.
4. Odolnost proti tepelnému namáhání.
5. Ekonomika provozu.

Mechanická pevnost zabezpečuje, aby vinutí sneslo bez poškození mechanické namáhání, které vzniká zejména při stahování během montáže a při zkratech, kdy na jednotlivé závity i cívky působí značné elektromagnetické síly.

Elektrická pevnost se týká konkrétně izolace vinutí, která musí vydržet bez poškození dlouhodobé namáhání střídavým elektrickým polem a stejně tak krátkodobá rázová namáhání během přepětí.

Z hlediska technické proveditelnosti je důležité, aby navržené vinutí bylo možné z technického hlediska zkonstruovat a aby byla výroba co nejjednodušší a nejlevnější.

Odolnost proti tepelnému namáhání je spjata s konstrukcí vinutí, která musí zaručovat dobré chlazení vinutí. Teplota izolace nesmí překročit hodnoty stanovené pro jejich třídu izolace.

S ekonomikou provozu je úzce spjata účinnost transformátoru a ztráty, které v tomto případě vznikají ve vinutí. Tyto ztráty ve vinutí nesmí překročit přípustné hodnoty.

[2]

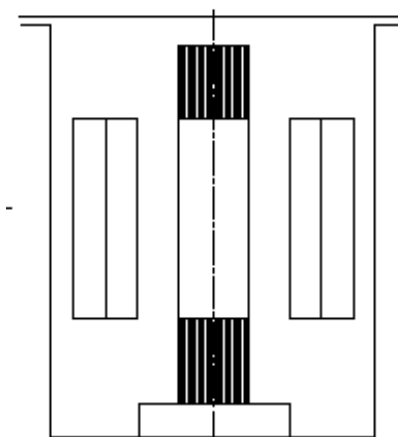
3 Tvary nádob

Nádoby transformátorů se vyrábějí ze zpevněné, za studena válcované oceli. Jsou svařovány takovým způsobem, aby byla zachována maximální těsnost. Uvnitř nádoby se na dno přivařují vodítka pro zajištění vloženého jádra. Na kratší stěnu nádoby se přivařuje trubka pro výpust, na kterou se našroubuje výpustní kohout. Na dno nádoby se ještě umísťují nosníky, které unášejí osy pojízdných koleček.

Základní tvary nádob olejových transformátorů jsou: vanová a zvonová nádoba. [3]

Vanová nádoba

Výhodou tohoto typu nádoby je její těsnost (obr. 18). Jelikož je víko nad hladinou oleje, nedochází tak k jeho úniku spoji a pokud je do transformátoru třeba zasáhnout, nemusí se vypouštět olej. Nevýhoda však nastává při opravách nebo demontáži, kdy je třeba vyzvednout samotný transformátor z nádoby. S tímto úkolem je spjata nutnost použít zdvihací zařízení, které zvládne transformátor vyzvednout. [3]

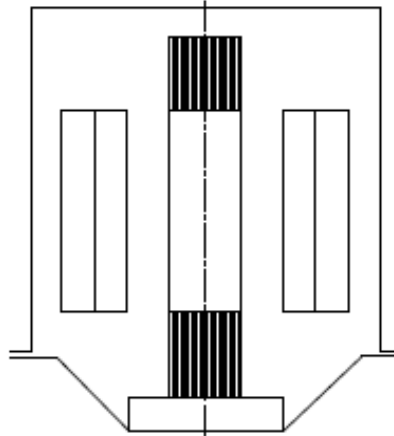


Obr. 18: Vanová nádoba transformátoru

Převzato z [3]

Zvonová nádoba

U zvonového typu nádoby je velkou výhodou snadná demontáž (obr. 19). Nemusí se totiž vyzvedávat těžký transformátor, jako při použití vanové nádoby, ale stačí pouze vyzvednout samotnou nádobu. Nevýhoda při použití této nádoby spočívá v těsnosti, jelikož je nádoba spojena pod úrovní hladiny oleje a pokud je třeba transformátor opravit, musí se olej vypustit. [3]



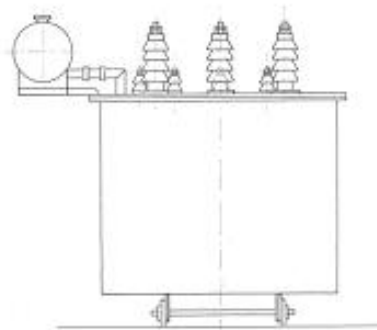
Obr. 19. Zvonová nádoba transformátoru

Převzato z [3]

Vanová i zvonová nádoba se dále rozlišuje na:

1. Hladká nádoba (obr. 20).
2. Vlnová nádoba (obr. 21).
3. Trubková nádoba (obr. 22a).
4. Harfová nádoba (obr. 22b).
5. Radiátorová nádoba.
6. Hermetická nádoba.

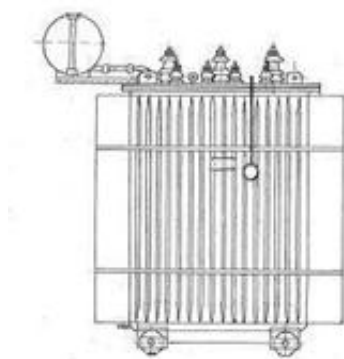
Hladká nádoba se používá u transformátorů malých výkonů, řádově desítky kVA. Olej se chladí přirozeně přestupem tepla na stěnu nádoby. [3]



Obr. 20: Hladká nádoba transformátoru

Převzato z [3]

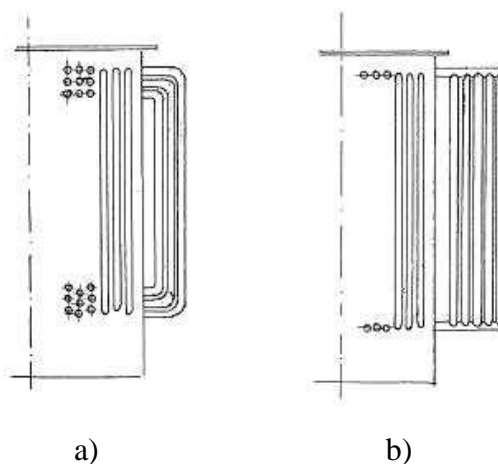
Vlnové nádoby se používají pro transformátory menších výkonů, kdy už ale nestačí chladičový povrch hladké nádoby, a proto se povrch nádoby zvětšuje zvlněním. Pro zvětšení chladičového povrchu se používají trojúhelníkové, obdélníkové nebo korýtkové vlny. [3]



Obr. 21: Vlnová nádoba transformátoru

Převzato z [3]

Pro transformátory středních výkonů se používají nádoby trubkové nebo harfové. Na stěny hladké nádoby se přivařují trubky nebo harfy, v kterých cirkuluje vlivem rozdílu teplot v horní a dolní části olej. [3]



Obr. 22: Nádoba transformátoru - a) trubková, b) harfová

Převzato z [3]

Radiátorové nádoby se používají pro transformátory velkých výkonů. Radiátory jsou speciální nádoby s malým obsahem a velkým povrchem. Části radiátorů mají většinou plochý průřez a vyrábí se ohnutím a svařením plechu. Tyto jednotlivé části se poté spojí a připevní na stěny nádoby.

Hermetická nádoba je v podstatě vlnová nádoba bez konzervátoru, kde k ochlazení dochází deformací vln na stěnách nádoby. K této deformaci dochází vlivem změny objemu oleje po jeho zahřátí. Transformátory s takovou nádobou se provozují do výkonu až 1500 kVA. [3]

4 Způsoby chlazení

Úkolem chlazení transformátoru je odvedení tepla, které vzniká v důsledku ztrát ve vinutí a v magnetickém obvodu. Vzniklé teplo se odvádí proto, aby nedošlo k poškození izolace a dalších částí transformátoru. Teplo vzniklé v magnetickém obvodu a ve vinutí se dostává důsledkem tepelné vodivosti na povrch těchto částí, odkud je podle způsobu chlazení rozvedeno přímo do okolí nebo odváděno kapalinou, jejímž prouděním je předáváno stěnám nádoby nebo stěnám chladiče. [3]

Podle druhu chladiva dělíme transformátory na:

1. Vzduchové - teplo je odváděno vzduchem.
2. Kapalinové - teplo je odváděno kapalinou.
3. Pískové - teplo se vyvádí plechovými vložkami mezi cívkami a převádí se na nádobu pomocí křemičitého písku.
4. Zalité - transformátor je zalit v izolantu, který teplo převádí dál.

Podle proudění chladiva se transformátory dělí na:

1. Přirozené.
2. S ofukováním.
3. S umělým oběhem.

V případě přirozeného chlazení transformátorů využíváme jako chladiva vzduchu nebo oleje.

Při použití vzduchu jako chladiva jsou aktivní části transformátoru ochlazovány přirozenou konvekcí. Vinutí těchto transformátorů je převážně jednoduché a jeho povrch je natřen pro lepší odvod tepla.

Častějším chladivem bývá olej, který přenáší teplo z aktivních částí transformátoru na nádobu a chladiče. Olej proudí uvnitř nádoby přirozeným vztlakem. Podél cívek se olej ohřívá a stoupá vzhůru, zatímco na stěnách nádoby, v trubkách nebo jiných chladičích se olej ochlazuje a klesá dolů. [3]

U transformátorů s ofukováním se využívá proudícího vzduchu, vyvolaného ventilátory.

Jestli-že se jedná o vzduchem chlazený transformátor, je vzniklé teplo odváděno

proudem vzduchu. Tyto transformátory jsou umístěny ve speciálních skříních s potřebně velkými otvory v horní části pro odchod teplého vzduchu, přičemž ventilátor je umístěn ve spodní části.

U olejových transformátorů je vzduchem z ventilátorů ochlazován povrch radiátorů nebo trubek. Zde může každému radiátoru náležet jeden ventilátor, nebo může být ventilátor umístěn pod radiátory, kde dochází k chlazení svislým proudem vzduchu. [3]

Transformátory s umělým oběhem jsou jak olejové, tak i vzduchové a mají uzavřený okruh.

Vzduchové transformátory jsou uzavřeny ve speciálních nádobách naplněných plynem, jehož proudění je vyvoláno ventilátorem umístěným mimo nádobu. Vinutí transformátorů je soustředné s četnými svislými i vodorovnými kanály. Prostor ventilátoru je spojen trubkami s vnitřkem nádoby.

Olejové transformátory s umělým oběhem jsou umístěny v hladké nádobě, kde je oběh oleje zajištěn čerpadly. Ohřátý olej se odčerpává z vrchu nádoby a je ochlazován v chladiči umístěným mimo nádobu. Dále jde olej přes filtr a čerpadlo zpět do nádoby. [3]

Další možností chlazení je kombinace uvedených způsobů chlazení, např. přirozené chlazení + ofukování radiátorů, apod.

Moderní řešení chlazení transformátorů menších a středních výkonů již nepoužívá konzervátor. Jedná se o tzv. hermetické transformátory, kde se transformátor chladí rozpínáním oleje. [3]

5 Výpočet

Následující část práce je věnována návrhu třífázového transformátoru s parametry dle zadání. Z hlediska konstrukčního uspořádání magnetického obvodu jsem zvolil jádrový typ transformátoru skládaný z plechů přeplátovaných pod úhlem 45° a skládaných metodou step-lap. Plechy, které jsem pro návrh použil, jsou z křemíkové oceli, válcované za studena, a mají tloušťku 0,3 mm. Průřez jádra jsem zvolil kruhový s pěti stupni a průřez spojky čtyřhranný. V magnetickém obvodu jsem neuvažoval žádné chladicí kanály. Vinutí je navrhováno jako souosé jednoduché tak, že vinutí nižšího napětí je blíže jádru. Jako chladicí medium jsem uvažoval olej s přirozeným oběhem. Další náležitosti chlazení, ani tvar nádoby, není v tomto návrh řešen. Návrh není zaměřen na silové účinky a tepelné namáhání magnetického obvodu ani vinutí. Veličiny s indexem 1 jsou uvažovány jako veličiny na straně vyššího napětí, veličiny s indexem 2 jsou pak pro stranu nižšího napětí. Při návrhu jsem vycházel především z literatury [2], [4] a [1].

Zadání

$$S = 500 \text{ kVA}$$

$$U_1 = 6,3 \text{ kV}$$

$$U_2 = 0,4 \text{ kV}$$

$$m = 3$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$u_k = \text{do } 6 \%$$

Fázové proudy

$$I_1 = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6300} = 45,82 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_2} = \frac{500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 721,69 \text{ A}$$

Průřez jádra

- konstanta $c = 4 \div 6$ pro olejem chlazené transformátory
- konstanta $k = 3$ pro třífázový jádrový transformátor

$$S_{Fe} = c \cdot \sqrt{\frac{S}{k \cdot f}} \cdot 10^{-4} = 5 \cdot \sqrt{\frac{500 \cdot 10^3}{3 \cdot 50}} \cdot 10^{-4} = 0,0289 \text{ m}^2$$

- činitel plnění železa $k_{Fe} = 0,955$

$$S_j = \frac{S_{Fe}}{k_{Fe}} = \frac{0,0289}{0,955} = 0,0303m^2$$

Průměr opsané kružnice jádra

- činitel plnění kruhu pro jádro s 5 stupni je 0,7127

$$d = \sqrt{\frac{S_j}{0,7127}} = \sqrt{\frac{0,0303}{0,7127}} = 0,206m$$

Rozměry jednotlivých stupňů jádra

$$b_1 = 0,9495 \cdot d = 0,9495 \cdot 0,206 = 0,196m$$

$$b_2 = 0,8458 \cdot d = 0,8458 \cdot 0,206 = 0,174m$$

$$b_3 = 0,7071 \cdot d = 0,7071 \cdot 0,206 = 0,146m$$

$$b_4 = 0,5335 \cdot d = 0,5335 \cdot 0,206 = 0,110m$$

$$b_5 = 0,3138 \cdot d = 0,3138 \cdot 0,206 = 0,065m$$

Magnetická indukce v jádře

$$B = 1,1 + 0,14 \cdot \log \frac{S}{10^3} = 1,1 + 0,14 \cdot \log \frac{500 \cdot 10^3}{10^3} = 1,48T$$

Magnetický tok v jádře

$$\phi = B \cdot S_{Fe} = 1,48 \cdot 0,0289 = 0,0427Wb$$

Napětí indukované na jeden závit

$$U_{in} = 4,44 \cdot \phi \cdot f = 4,44 \cdot 0,0427 \cdot 50 = 9,486V$$

Počty závitů vinutí

$$N_2 = \frac{U_2}{U_{in}} = \frac{400}{9,486} = 42$$

$$N_1 = N_2 \cdot \frac{U_1}{U_2} = 42 \cdot \frac{6300}{400} = 660$$

Zpřesnění jmenovité magnetické indukce

$$B_j = \frac{U_1}{4,44 \cdot N_1 \cdot S_j \cdot f} = \frac{6300}{4,44 \cdot 660 \cdot 0,0303 \cdot 50} = 1,42T$$

Výška jádra

- proudové zatížení železa $A = 67 \cdot 10^3 A \cdot m^{-1}$, pro $S = 500kVA$

$$l = \frac{2 \cdot I_1 \cdot N_1}{A} = \frac{2 \cdot 45,82 \cdot 660}{67 \cdot 10^3} = 0,905m$$

Proudová hustota

$$J = 1,65 + 0,82 \cdot \log \frac{S}{10^3} = 1,65 + 0,82 \cdot \log \frac{500 \cdot 10^3}{10^3} = 3,86A \cdot mm^{-2}$$

Průřezy vodičů

$$S_1 = \frac{I_1}{J} = \frac{45,82}{3,86} = 11,87mm^2$$

$$S_2 = \frac{I_2}{J} = \frac{721,69}{3,86} = 186,97mm^2$$

Volba vodiče pro vinutí nižšího napětí

- je použito 5 paralelních vodičů v řadě
- jejich rozměry jsou 1,85 x 20,02mm, lakovaná izolace tloušťky 0,3mm

$$b_i = 20,62mm$$

$$b = 20,02mm$$

$$t_i = 12,25mm$$

$$t = 9,25mm$$

Volba vodiče pro vinutí vyššího napětí

- je použit vodič, jehož rozměry jsou 5,9 x 2mm, lakovaná izolace tloušťky 0,3mm

$$v_i = 6,5mm$$

$$v = 5,9mm$$

$$u_i = 2,6mm$$

$$u = 2mm$$

Skutečné průřezy vodičů

$$S_1 = v \cdot u = 5,9 \cdot 2 = 11,8mm^2$$

$$S_2 = b \cdot t = 20,02 \cdot 9,25 = 185,19mm^2$$

Skutečné proudové hustoty

$$J_1 = \frac{I_1}{S_1} = \frac{45,82}{11,8} = 3,88A \cdot mm^2$$

$$J_2 = \frac{I_2}{S_2} = \frac{721,69}{185,19} = 3,9A \cdot mm^2$$

Volná výška cívky nižšího napětí

- izolační vzdálenost cívky od spojky $d_2 = 15mm$

$$l_{c2s} = l - 2 \cdot d_2 = 0,905 - 2 \cdot 0,015 = 0,875m$$

Skutečná výška cívky nižšího napětí

- volnost vertikálně $s_{vv} = 1,01$
- počet prostřídání paralelních vodičů $n_k = 0$
- počet vodičů ve vrstvě $N_v = 42$

$$l_{c2s} = s_{vv} \cdot (N_v + 2 \cdot n_k) \cdot b_i = 1,01 \cdot (42 + 2 \cdot 0) \cdot 20,62 = 0,875m$$

Šířka cívky nižšího napětí

- mezivrstvá izolace $s_v = 0,4mm$
- volnost horizontálně $s_{vh} = 1,06$
- počet vrstev $n_v = 1$

$$a_2 = s_{vh} \cdot (n_v \cdot t_i + (s_v \cdot (n_v - 1))) = 1,06 \cdot (1 \cdot 12,25 + (0,4 \cdot (1 - 1))) = 12,99mm$$

Volná výška cívky vyššího napětí

- izolační vzdálenost cívky od spojky $d_1 = 19mm$

$$l_{c1} = l - 2 \cdot d_1 = 0,905 - 2 \cdot 0,019 = 0,867m$$

Skutečná výška cívky vyššího napětí

- volnost vertikálně $s_{vv} = 1,01$
- počet prostřídání paralelních vodičů $n_k = 0$
- počet vodičů ve vrstvě $N_v = 132$

$$l_{c1s} = s_{vv} \cdot (N_v + 2 \cdot n_k) \cdot d_i = 1,01 \cdot (132 + 2 \cdot 0) \cdot 6,5 = 0,867m$$

Šířka cívky vyššího napětí

- mezivrstvá izolace $s_p = 0,12mm$
- volnost horizontálně $s_{vh} = 1,02$
- počet vrstev $n_v = 5$

$$a_1 = s_{vh} \cdot (n_v \cdot u_i + (s_p \cdot (n_v - 1))) = 1,02 \cdot (5 \cdot 2,6 + (0,12 \cdot (5 - 1))) = 13,75mm$$

Střední výška cívky

$$l_c = \frac{l_{c1s} + l_{c2s}}{2} = \frac{0,867 + 0,875}{2} = 0,871m$$

Izolační vzdálenost mezi sousedními vinutími vyššího napětí

$$c = 0,7 \cdot \frac{U_1}{10^3} + 7 = 0,7 \cdot \frac{6,3 \cdot 10^3}{10^3} + 7 = 11,41 \text{ mm}$$

Vzdálenost os jader

- izolační vzdálenost cívky od jádra $e = 8 \text{ mm}$
- izolační vzdálenost mezi vinutím vn a nn $b = 20 \text{ mm}$

$$M = d + c + 2 \cdot (a_1 + a_2 + e + b) = 206 + 11,41 + 2 \cdot (13,75 + 12,99 + 8 + 20) = 326,89 \text{ mm}$$

Rozměry spojky

$$b_{sp} = b_1 = 0,196 \text{ m}$$

$$h_{sp} = \frac{S_j}{b_{sp}} = \frac{0,0303}{0,196} = 0,1546 \text{ m}$$

Kontrola převodu

- napěťový převod

$$p_U = \frac{U_1}{U_2} = \frac{6300}{400} = 15,75$$

- převod závitů

$$p_N = \frac{N_1}{N_2} = \frac{660}{42} = 15,71$$

- chyba převodu

$$\Delta p = \frac{p_U - p_N}{p_U} \cdot 100 = \frac{15,75 - 15,71}{15,75} \cdot 100 = 0,25\%$$

Průměry vinutí

$$d_{s1} = a_1 + 2 \cdot b + 2 \cdot a_2 + 2 \cdot e + d = 13,75 + 2 \cdot 20 + 2 \cdot 12,99 + 2 \cdot 8 + 206 = 301,73 \text{ mm}$$

$$d_{s2} = 2 \cdot e + a_2 + d = 2 \cdot 8 + 12,99 + 206 = 234,99 \text{ mm}$$

$$d_s = \frac{d_{s1} + d_{s2}}{2} = \frac{301,73 + 234,99}{2} = 268,36 \text{ mm}$$

Hmotnost vinutí

- hustota mědi $\gamma_{Cu} = 8890 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$$m_{v1} = \pi \cdot d_{s1} \cdot N_1 \cdot S_1 \cdot \gamma_{Cu} = \pi \cdot 0,302 \cdot 660 \cdot 11,8 \cdot 10^{-6} \cdot 8890 = 65,63 \text{ kg}$$

$$m_{v2} = \pi \cdot d_{s2} \cdot N_2 \cdot S_2 \cdot \gamma_{Cu} = \pi \cdot 0,235 \cdot 42 \cdot 185,19 \cdot 10^{-6} \cdot 8890 = 51,05 \text{ kg}$$

$$m_v = 3 \cdot (m_{v1} + m_{v2}) = 3 \cdot (65,63 + 51,05) = 350,03 \text{ kg}$$

Odpory vinutí

- měrný elektrický odpor mědi $\rho_{Cu} = 0,0178 \Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$

$$R_1 = \frac{\rho_{Cu} \cdot \pi \cdot d_{s1} \cdot N_1}{S_1} = \frac{0,0178 \cdot \pi \cdot 0,302 \cdot 660}{11,8} = 0,945 \Omega$$

$$R_2 = \frac{\rho_{Cu} \cdot \pi \cdot d_{s2} \cdot N_2}{S_2} = \frac{0,0178 \cdot \pi \cdot 0,235 \cdot 42}{185,19} = 0,00298 \Omega$$

$$R_{21} = R_2 \cdot p_N^2 = 0,00298 \cdot \left(\frac{660}{42}\right)^2 = 0,736 \Omega$$

$$R = R_1 + R_{21} = 0,945 + 0,736 = 1,681 \Omega$$

Reaktance vinutí

$$X = \frac{8 \cdot f \cdot N_1^2 \cdot \pi \cdot d_s}{l_c} \cdot \left(b + \frac{a_1 + a_2}{3}\right) \cdot 10^{-6} =$$

$$= \frac{8 \cdot 50 \cdot 660^2 \cdot \pi \cdot 0,2683}{0,871} \cdot \left(0,02 + \frac{0,01375 + 0,01299}{3}\right) \cdot 10^{-6} = 4,875 \Omega$$

Impedance vinutí

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{1,681^2 + 4,875^2} = 5,16 \Omega$$

Napětí nakrátko

$$U_k = I_1 \cdot Z = 45,82 \cdot 5,16 = 236,3V$$

Procentní napětí nakrátko

$$u_k = \frac{U_k}{U_1} \cdot 100 = \frac{236,3}{6300} \cdot 100 = 3,75\%$$

Tepelné ztráty ve vinutí

$$\Delta P_{j1} = R_1 \cdot I_1^2 = 0,945 \cdot 45,82^2 = 1984W$$

$$\Delta P_{j2} = R_2 \cdot I_2^2 = 0,00298 \cdot 721,69^2 = 1552,1W$$

$$\Delta P_j = 3 \cdot (\Delta P_{j1} + \Delta P_{j2}) = 3 \cdot (1984 + 1552,1) = 10608,3W$$

Hmotnost jader a spojek

- činitel plnění železa $k_{Fe} = 0,955$

- hustota železa $\gamma_{Fe} = 7600 kg \cdot m^{-3}$

$$m_j = 3 \cdot S_j \cdot l \cdot k_{Fe} \cdot \gamma_{Fe} = 3 \cdot 0,0303 \cdot 0,905 \cdot 0,955 \cdot 7600 = 597,1kg$$

$$\begin{aligned}
 m_s &= 4 \cdot \left(M \cdot h_{sp} \cdot b_{sp} + \frac{S_j}{2} \cdot h_{sp} \right) \cdot k_{Fe} \cdot \gamma_{Fe} = \\
 &= 4 \cdot \left(0,3269 \cdot 0,1546 \cdot 0,196 + \frac{0,0303}{2} \cdot 0,1546 \right) \cdot 0,955 \cdot 7600 = 355,56 \text{ kg} \\
 m_{Fe} &= m_j + m_s = 597,1 + 355,56 = 952,68 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Ztráty v železe

- měrný ztrátový výkon $p_{Fe} = 0,76 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, při $f = 50 \text{ Hz}$ a $B = 1,42 \text{ T}$

$$\Delta P_{Fe} = p_{Fe} \cdot m_{Fe} = 0,76 \cdot 952,68 = 724 \text{ W}$$

Účinnost

$$\eta = \frac{S - \Delta P_{Fe} - \Delta P_j}{S} \cdot 100 = \frac{500 \cdot 10^3 - 724 - 10608,3}{500 \cdot 10^3} \cdot 100 = 97,73\%$$

Proud nakrátko

$$I_{1k} = \frac{U_1}{Z} = \frac{6300}{5,16} = 1221 \text{ A}$$

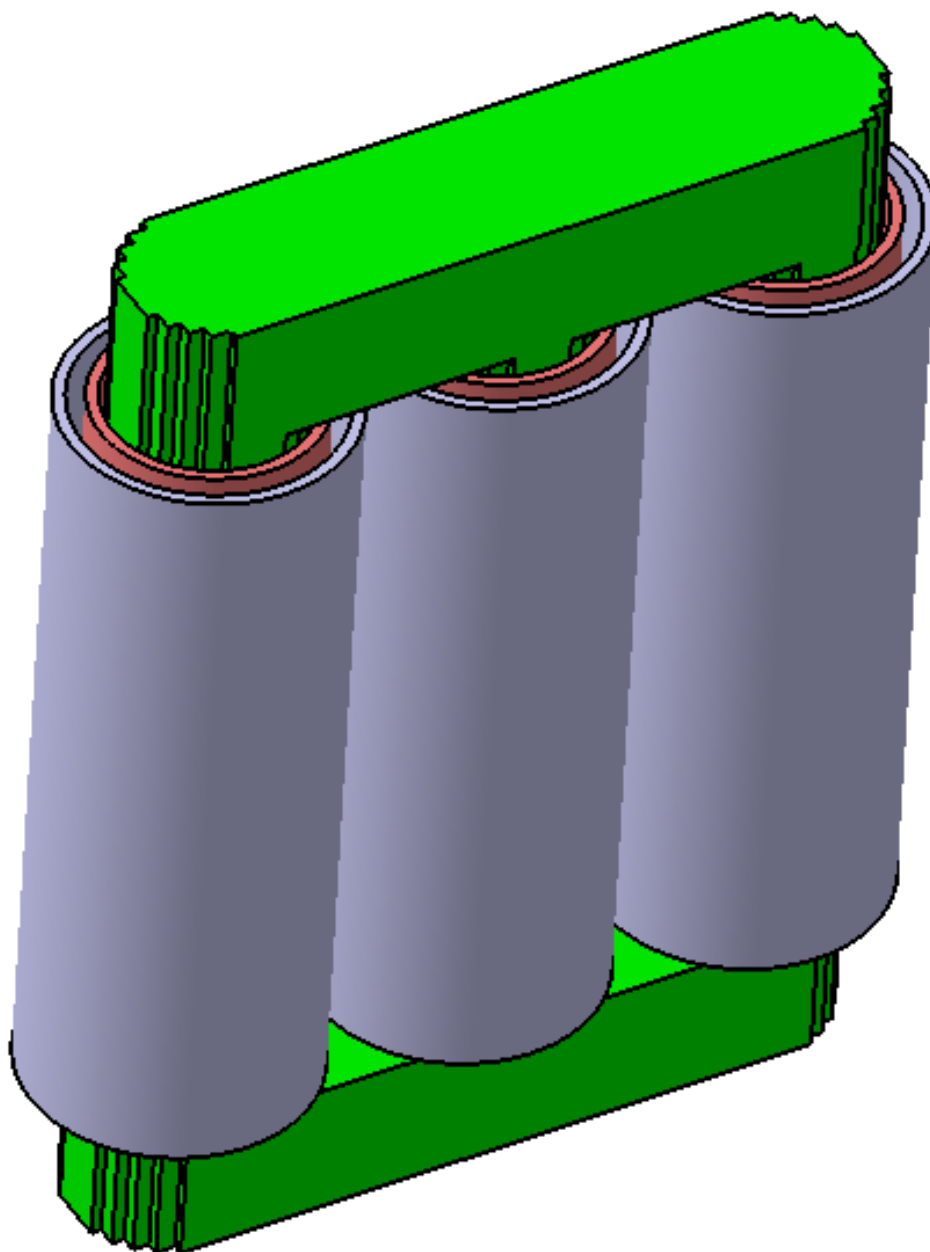
Účinník

$$\cos \varphi_k = \frac{R}{Z} = \frac{1,681}{5,16} = 0,33$$

6 3D model

Tento 3D model byl vytvořen v návrhovém systému CATIA V5, který je převážně využíván v automobilovém a leteckém průmyslu, nicméně pro parametrický model zadaného transformátoru je tento systém naprosto dostačující.

Veškeré rozměry a hodnoty potřebné pro návrh modelu jsou stanoveny v předchozím bodě této práce. Model slouží pro představu skutečné konstrukce navrhnutého transformátoru.

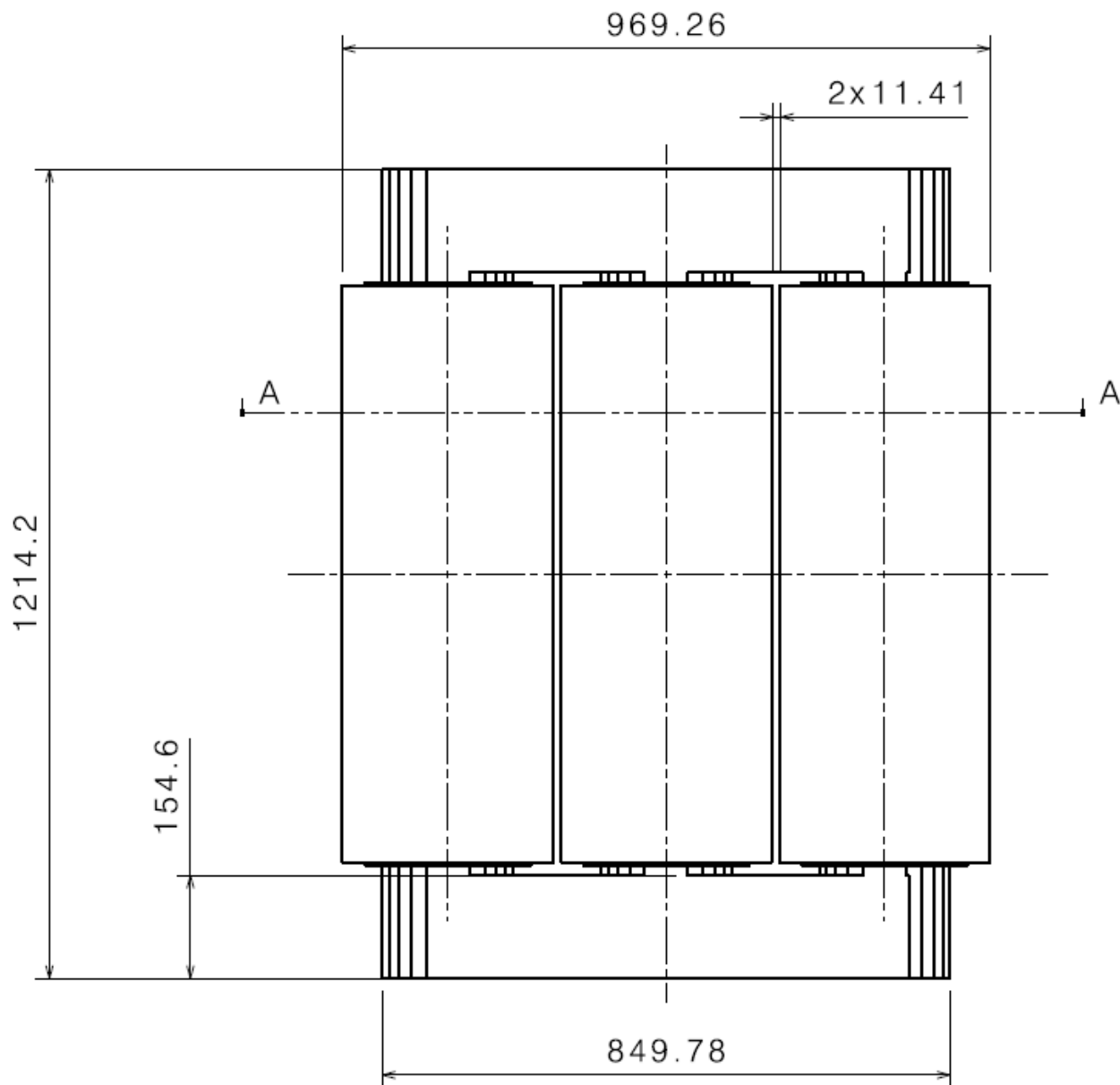


Obr. 23: 3D model navrhnutého transformátoru

7 Rozměrový výkres

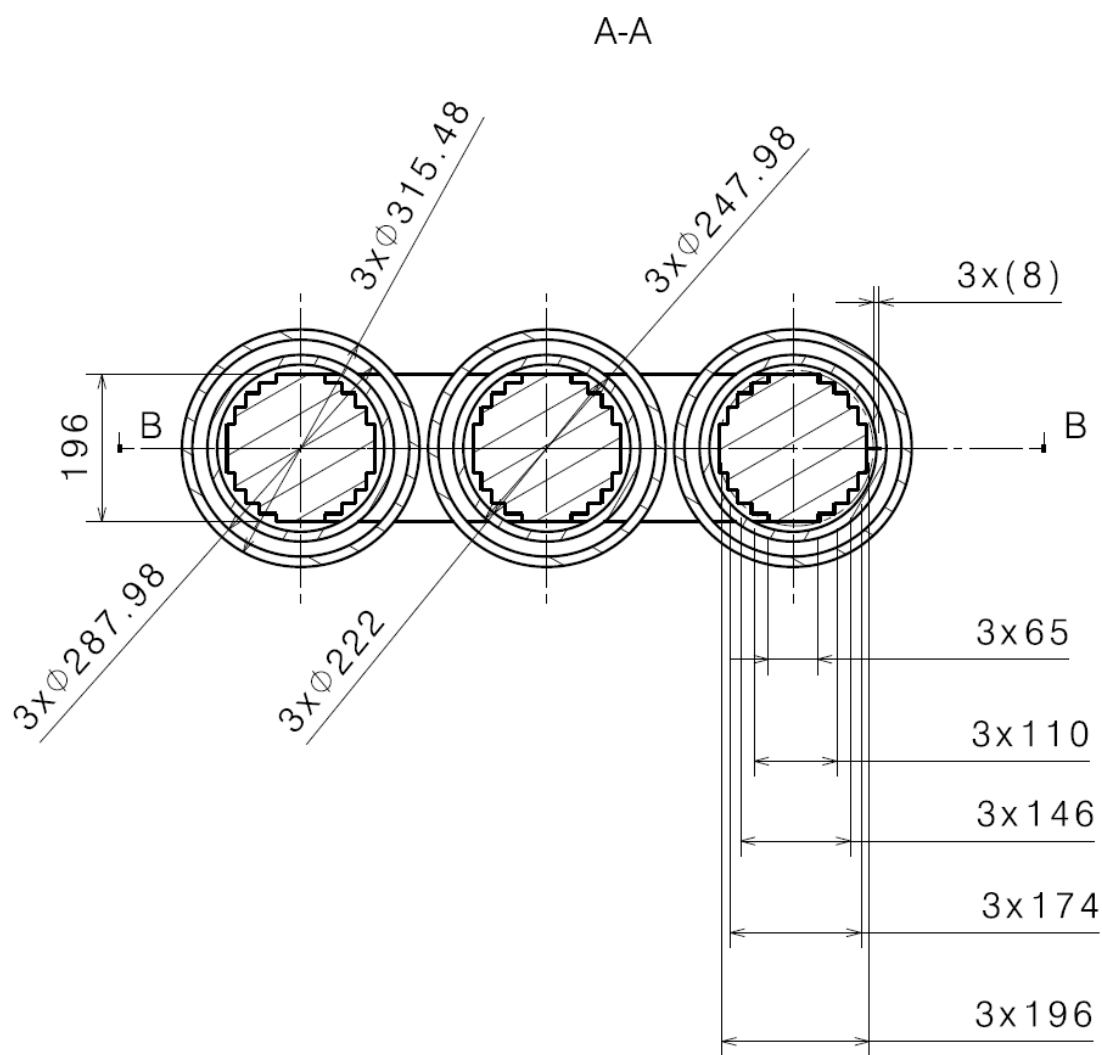
K vytvoření rozměrového výkresu transformátoru byl rovněž použit návrhový systém CATIA V5.

Z výkresů jsou patrné jednotlivé rozměry magnetického obvodu a vinutí (obr. 24, obr. 25, obr. 26).

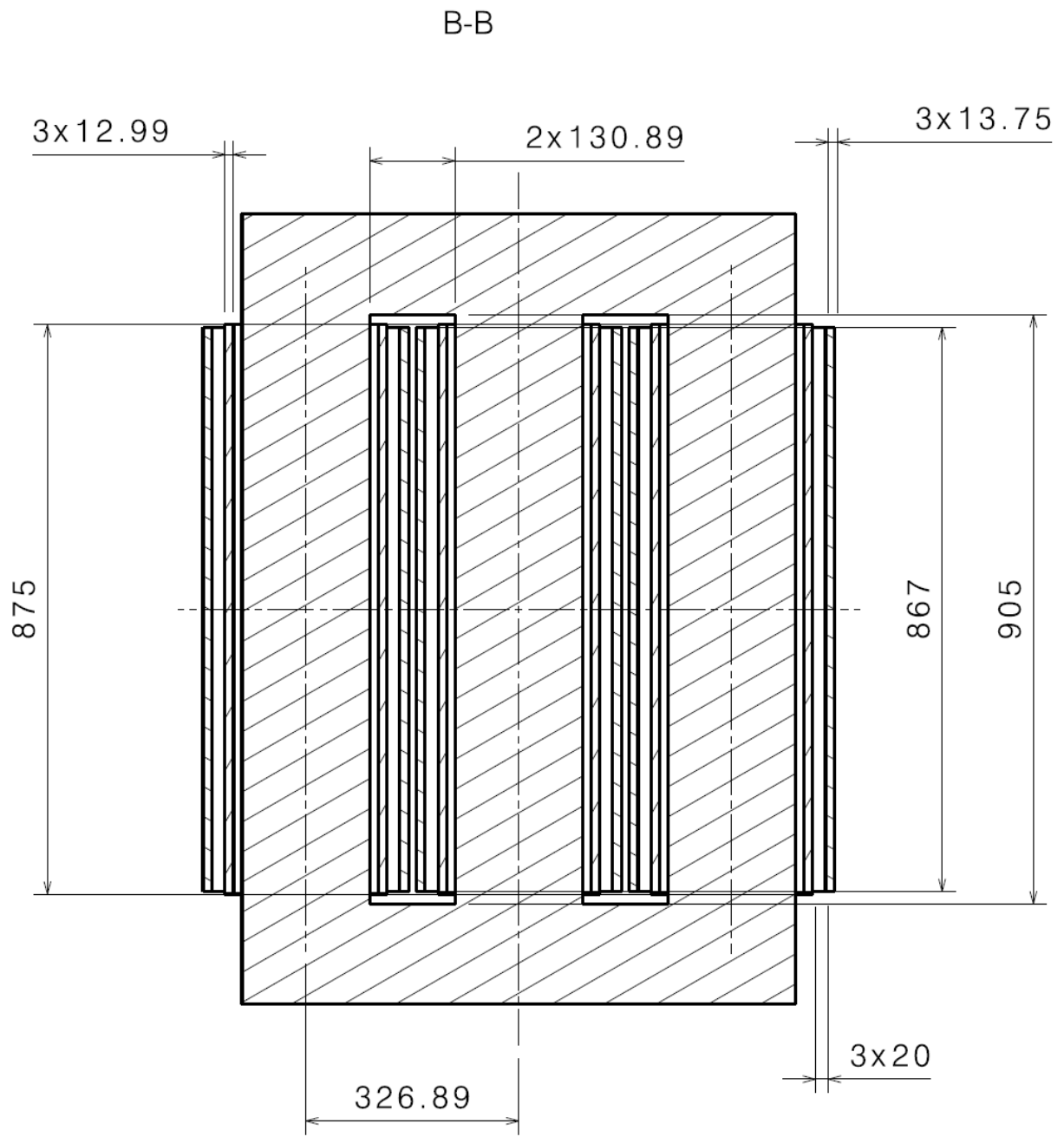


Měřítko 1:10

Obr. 24: Čelní pohled navrhnutého transformátoru v měřítku 1:10



Obr. 25: Příčný řez navrhnutého transformátoru



Měřítko 1:10

Obr. 26: Podélný řez navrhnutého transformátoru

Závěr

Dle zadání této bakalářské práce jsem její začátek věnoval magnetickým obvodům a vinutím transformátorů. Zde jsem popsal konstrukční možnosti uspořádání magnetických obvodů a vinutí, a materiály, které je zde možné použít. Na základně této teoretické části jsem byl později schopen zvolit konstrukční uspořádání a materiály magnetického obvodu a vinutí pro samotný elektromagnetický návrh zadaného transformátoru.

Podle hodnot zadaných vedoucím práce jsem vypracoval návrh magnetického obvodu a vinutí transformátoru. Důležitým faktorem při návrhu bylo dodržení napětí nakrátko, které je závislé především na reaktanci vinutí transformátoru. To bylo splněno již při prvním výpočtu, nicméně následnými úpravami se mi napětí nakrátko podařilo snížit zhruba o 1% na konečnou hodnotu 3,75%. Při návrhu jsem se také snažil o maximální vyplnění vnitřního okna magnetického obvodu.

Na základě předchozího výpočtu jsem získal všechny potřebné rozměry pro vytvoření parametrického 3D modelu navrhnutého magnetického obvodu a vinutí. Z tohoto modelu jsem posléze vytvořil také rozměrový výkres již zmíněného magnetického obvodu a vinutí. 3D model i rozměrový výkres byl vytvořen v návrhovém systému CATIA V5.

Systému CATIA V5 jsem využil i pro stanovení hmotnosti magnetického obvodu a vinutí. Tyto výsledky jsem porovnával s výsledky získanými ručním výpočtem.

Hmotnost magnetického obvodu získaná ručním výpočtem činila hodnotu 952,68 kg a hmotnost stanovená systémem CATIA V5 činila hodnotu 998,553 kg (obr. 27). Rozdíl hmotnosti je zapříčiněn tím, že magnetický obvod byl v návrhovém systému kreslen jako celek, tedy nelistěný, a není zde tedy nijak započítán činitel plnění železa. Pokud hmotnost stanovenou systémem CATIA V5 vynásobím činitelem plnění železa, získám skutečnou hmotnost magnetického obvodu, která je 953,62 kg.

$$m_{FeSKUT} = m_{FeCATIA} \cdot k_{Fe} = 998,553 \cdot 0,955 = 953,62kg$$

Rozdíl mezi hmotnostmi magnetického obvodu získanou ručním výpočtem a návrhovým systémem je 0,94 kg. Tento rozdíl se dle výpočtu téměř vůbec neprojeví na celkové účinnosti transformátoru, ani na jiných štitkových údajích transformátoru. Pokud vztáhneme rozdílnou hmotnost k hmotnosti stanovené ručním výpočtem, je tento procentní rozdíl 0,099 % a lze jej tedy považovat za zanedbatelný.

| Characteristics | | Center Of Gravity (G) | |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|----------|
| Volume | 0,131m ³ | Gx | 326,96mm |
| Area | 3,227m ² | Gy | 0mm |
| Mass | 998,553kg | Gz | 607,1mm |
| Density | 7600kg_m ³ | | |

Obr. 27: Hmotnost magnetického obvodu získaná pomocí návrhového systému CATIA V5

Hmotnost vinutí získaná ručním výpočtem je 350,03 kg. Hmotnost vinutí získaná pomocí návrhového systému je však 525,169 kg, jelikož jsem vinutí kreslil opět jako celek a návrhový systém celkovou hmotnost počítal jako jednotný kus mědi (obr. 28). Úpravou dle následujících vzorců, ve kterých vezmeme v úvahu objem izolace vodičů, horizontální a vertikální volnost, mezivrstvou izolaci, střední průměry cívek a počty závitů, dostaneme objem izolace v cívkách. Pokud objem izolace vynásobíme hustotou mědi a tuto hodnotu odečteme od hmotnosti stanovené návrhovým systémem, získáme skutečnou hmotnost vinutí.

$$V_{iz1} = \pi \cdot d_{s1} \cdot N_1 \cdot \left((v_i \cdot u_i \cdot s_{vv} \cdot s_{vh} - v \cdot u) + s_p \cdot s_{vh} \cdot (n_v - 1) \right) =$$

$$= \pi \cdot 0,30173 \cdot 660 \cdot \left((0,0065 \cdot 0,0026 \cdot 1,01 \cdot 1,02 - 0,0059 \cdot 0,002) + 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot 1,02 \cdot (5 - 1) \right) =$$

$$= 3,97 \cdot 10^{-3} m^3$$

$$V_{iz2} = \pi \cdot d_{s2} \cdot N_2 \cdot (b_i \cdot t_i \cdot s_{vv} \cdot s_{vh} - b \cdot t) =$$

$$= \pi \cdot 0,235 \cdot 42 \cdot (0,02062 \cdot 0,01225 \cdot 1,01 \cdot 1,06 - 0,02002 \cdot 0,00925) = 2,64 \cdot 10^{-3} m^3$$

$$V_{iz} = 3 \cdot (V_{iz1} + V_{iz2}) = 3 \cdot (3,97 \cdot 10^{-3} + 2,64 \cdot 10^{-3}) = 19,34 \cdot 10^{-3} m^3$$

$$m_{vSKUT} = m_{vCATIA} - (V_{iz} \cdot \gamma_{Cu}) = 525,169 - (19,34 \cdot 10^{-3} \cdot 8890) = 348,68 kg$$

Rozdíl mezi hmotnostmi vinutí získanou ručním výpočtem a návrhovým systémem je 1,35 kg. To je procentní rozdíl 0,39 %. Tento rozdíl se opět ve výpočtu neprojeví na základních parametrech transformátoru, a lze ho tedy považovat za zanedbatelný.

| Characteristics | | Center Of Gravity (G) | |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|----------|
| Volume | 0,059m ³ | Gx | 326,89mm |
| Area | 8,943m ² | Gy | 0mm |
| Mass | 525,169kg | Gz | 607,1mm |
| Density | 8890kg_m ³ | | |

Obr. 28: Hmotnost vinutí získaná pomocí návrhového systému CATIA V5

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 1*. Praha: Academia, 1980
- [2] ŠOBRA, Jan. *Návrh středofrekvenčního transformátoru*. Plzeň, 2010. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická.
- [3] RŮŽEK, Josef. *Přehled konstrukčního uspořádání transformátorů*. Plzeň, 2010. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická.
- [4] KONÍČEK, Václav. Elektrické stroje. In: *vosaspsekrizik.cz* [online]. [cit. 10.7.2014]. Dostupné z: [http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/sps/studijni-materialy/elektricke-stroje-a-pristroje-\(es\).ep/](http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/sps/studijni-materialy/elektricke-stroje-a-pristroje-(es).ep/)
- [5] PÍCHA, Vlastimil. Návrh transformátoru. In: *vpicha.cz* [online]. [cit. 23.7.2014]. Dostupné z: http://www.vpicha.cz/sites/default/files/NAVRH%20TRANSFORMATORU_0.pdf
- [6] DISTRIBUČNÍ TRANSFORMÁTORY. CG Power systems. Propagační brožura. Dostupné z: www.riapower.cz
- [7] LAKOVANÉ MĚDĚNÉ DRÁTY. Silent-Czech spol. Propagační brožura. Dostupné z: www.silent-czech.cz
- [8] GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEELS. Arcelor Mittal. Propagační brožura. Dostupné z: www.arcelormittal.com/frydek-mistek