



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole

Návrh transformátoru VVN pro elektrostatický odlučovač popílku

**Design of a high voltage rectifier transformer for
electrostatic precipitator**

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: Doc. Ing. Vítězslav Pankrác, CSc.

Ondřej Šefl

Praha 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Šefl** Ondřej

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektrotechnika a management

Název tématu:

Návrh transformátoru VVN pro elektrostatický odlučovač popílku

Pokyny pro vypracování:

1. Vhodné varianty konstrukčního řešení transformátoru.
2. Detailní elektromagnetický návrh transformátoru pro zvolené varianty.
3. Porovnání variant z hlediska ekonomické efektivity.

Seznam odborné literatury:

1. Karsai K., Kerényi D., Kiss L.: Large Power Transformers. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1987.
2. Jarošek J., Plencner R.: Transformátory. Slovenské vydavateľství technické literatury, Bratislava, 1961.

Vedoucí bakalářské práce: Doc.Ing. Vítězslav Pankrác, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Doc.Ing. Jaroslav Knápek, CSc.

vedoucí katedry

Prof.Ing. Pavel Ripka, CSc.

děkan

V Praze dne 10.2.2015

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Doc. Ing. Vítězslavovi Pankráčovi, CSc. za odborné konzultace dané problematiky a za věcné připomínky k některým aspektům mé práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Lubomírovi Musálkovi za odbornou asistenci s programem Agros2D a Tomáši Hábovi za poskytnuté rady při tvorbě ekonomického zhodnocení projektů. Na závěr bych také rád poděkoval své rodině za podporu a schovívavost během doby mého studia.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Název práce: Návrh transformátoru VVN pro elektrostatický odlučovač popílků

Autor: Ondřej Šefl

Katedra/Ústav: Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Ing. Vítězslav Pankrác, CSc.

Anotace: Tato bakalářská práce se zaměřuje na návrh transformátorů a sériových tlumivek (reaktorů) jako zdrojů pro elektrostatické odlučovače popílků. Hlavním úkolem práce je porovnání dvou variant provedení zdrojů pro odlučovače: transformátoru s vysokou rozptylovou reaktancí a soustavy transformátor a sériová tlumivka. Nejprve je detailně popsána volba rozličných koeficientů souvisejících s použitými materiály a izolací a také volba vstupních a výstupních parametrů celého bloku. V průběhu práce jsou dále pomocí poznatků z teorie elektromagnetického pole odvozovány jednotlivé fyzikální vztahy potřebné pro výpočet ztrát, rozměrů a hmotností jednotlivých částí zmíněných elektrických strojů. Posléze se ze spočtené hmotnosti určí cena obou variant a v závěru práce se pomocí ekonomického kritéria čisté současné hodnoty zvolí výhodnější varianta.

Klíčová slova: transformátor, tlumivka, elektrostatický odlučovač popílků, návrh

Title: Design of a high voltage rectifier transformer for electrostatic precipitator

Author: Ondřej Šefl

Department: Department of Economics, Management and Humanities

Supervisor: Doc. Ing. Vítězslav Pankrác, CSc.

Abstract: This bachelor thesis focuses on design of transformers and reactors that serve as high voltage power supplies for electrostatic precipitators. Main goal of this thesis is comparison of two variants of these power supplies: transformer with high leakage reactance and series connection of reactor and transformer. Firstly, various coefficients related to used materials and insulation are determined along with input and output parameters of the system. In the next part of the work, specific formulas used to calculate losses, dimensions and weight of transformers and reactors are derived from the theory of electromagnetic field. Subsequently, total price of both variants is calculated from the determined weight and in the conclusion, the preferable variant is chosen using the economic criterion net present value.

Keywords: transformer, reactor, electrostatic precipitator, design

Obsah

Obsah.....	6
0 Úvod.....	7
1 Vhodné varianty konstrukčního řešení transformátoru	9
2 Detailní elektromagnetický návrh transformátoru pro zvolené varianty	11
2.1 Technické parametry obou řešení.....	11
2.2 Teoretické vztahy pro výpočet parametrů transformátoru	18
2.3 Technické parametry tlumivky	34
2.4 Teoretické vztahy pro výpočet tlumivky	36
2.5 Řešení varianty transformátor s vysokou reaktancí	38
2.6 Řešení varianty transformátor s nízkou reaktancí a tlumivka	40
3 Porovnání variant z hlediska ekonomické efektivity	43
Závěr.....	48
Reference.....	49
Přílohy.....	50

0 Úvod

Elektrostatický odlučovač popílku je elektrické zařízení sloužící k odstraňování specifických částic z proudícího plynu. Při provozu odlučovač vytváří stejnosměrné elektrické pole, které zmíněné částice (v našem případě popílek) nabijí záporně. Plyn obsahující tyto záporně nabitě částice poté prochází prostorem ohraničeným kladně nabitými deskami. Podle Coulombova zákona působí na částice elektrická síla a odnáší je směrem k deskám, zatímco plyn nerušeně proudí dál. Na tyto desky se postupně nahromadí vrstva popílku, která se jednou za čas odstraňuje, například rotačním vzduchovým ventilem [1]. Díky moderním technologiím výroby je odlučovač schopen při správném napájení odstranit až 99,9 % nečistot z proudícího média.

Primární využití odlučovače je ve filtraci kouře vycházejícího z kotle uhelných elektráren či plynu opouštějícího spalovací turbínu paroplynové elektrárny. V dnešní době se však využívá i ve spalovnách odpadu a biomasy, ve slévárnách mědi, zinku nebo olova, v ocelárnách, v cementárnách nebo v rafinériích [1].

Jeho užití je v moderní společnosti ve většině případů vyžadováno legislativou jednotlivých států, a díky tomu se kladou zvlášť vysoké nároky na ekonomičnost takovéto investice.

K vytvoření dostatečně silného elektrického pole mezi elektrodami odlučovače je zapotřebí poměrně vysoké napětí. V praxi se tak užívá napětí v rozmezí 10 až 150 kV [2]. S ohledem na výkon odlučovače obvykle postačí napájení ze sítě nízkého napětí, tedy 400 V.

Charakter provozu odlučovače klade kromě nároku na převod transformátoru i nárok na jeho napětí nakrátko. Nabité částice v prostoru mezi elektrodami často zkratují obvod, a proto je zapotřebí omezit velikost tohoto zkratového proudu. Hodnota zkratového proudu je dána reaktancí soustavy. V praxi se celý odlučovač navrhuje tak, aby jeho poměrná reaktance byla 40 %; nárazový zkratový proud pak dosahuje maximální hodnoty odpovídající $5\sqrt{2}$ násobku¹ jmenovitého proudu a ustálený zkratový proud pak pouze 2,5 násobku. Hodnota nárazového zkratového proudu rozhoduje o dynamických účincích (silových) a ustálená hodnota pak o tepelných účincích na izolaci. Reaktance 40 % je zvolena s ohledem právě na tyto účinky – nemůže tedy dojít k poškození stroje.

Požadované reaktance soustavy dosahujeme v praxi buď specifickou konstrukcí transformátoru pro zvýšení reaktance, nebo zapojením sériové tlumivky (reaktoru) do ob-

¹ $2,5 \cdot 2\sqrt{2}; 2\sqrt{2}$ představují poměr mezi maximální hodnotou nárazového zkratového proudu a jeho ustálenou hodnotou

vodu. Zvláštní konstrukce transformátoru pro zvýšení reaktance negativně ovlivňuje jeho rozměry, a tudíž vede i k vyšší pořizovací ceně. Stejně tak pořízení reaktoru povede k vyšším nákladům. Součástí této práce bude i porovnání těchto dvou možných řešení z hlediska ceny a ztrát.

Hlavním cílem tohoto projektu bude návrh zdroje pro elektrostatický odlučovač popítku. Kritériem vhodnosti návrhu bude cena pořízení zdroje i cena jeho provozu. Při výpočtech ceny pořízení se omezíme pouze na náklady spojené s koupí materiálu na nejpodstatnější části transformátoru – měď včetně izolace na vinutí a plechy z elektrotechnické oceli na magnetický obvod.

Užitím teoretických znalostí z oblasti elektrických strojů a teorie elektromagnetického pole bychom měli být schopni navrhnout zdroj odpovídající zadaným parametrům jednotlivých variant. Těchto návrhů zdrojů může být samozřejmě i více, v takovém případě vybereme návrh (návrhy) vyznačující se nejmenší cenou.

V projektu bychom také měli porovnat výsledné návrhy z hlediska ztrát v plánované době života jejich provozu. Může se stát, že levnější návrh bude mít o něco vyšší ztráty než mírně dražší návrh a za určitou dobu by náklady spojené s těmito ztrátami převýšily cenu za úsporu materiálu.

Jednotlivé části práce budou logicky seřazeny. V první kapitole detailně popíšeme jádro programu, který budeme využívat pro výpočet transformátoru. Stanovíme také kritéria pro výběr optimálního řešení a vše shrneme do přehledného vývojového diagramu.

V druhé kapitole nejprve stanovíme předem známé parametry transformátoru. Následovně odvodíme vztahy potřebné pro výpočet ceny transformátoru a pro porovnání s kritérii danými normou. Odvodíme také vztahy pro výpočet tlumivky u druhé varianty provedení zdroje pro odlučovač. Na závěr dosadíme určené parametry do výpočtového programu a výsledné hodnoty z obou variant zobrazíme v tabulkách.

V poslední kapitole porovnáme obě varianty z investičního hlediska a provedeme citlivostní analýzu z hlediska prognózy růstu ceny elektřiny.

1 Vhodné varianty konstrukčního řešení transformátoru

Jak již bylo uvedeno výše, v tomto projektu se budeme zabývat dvěma variantami provedení transformátoru. Obě varianty budou v základu dány napětím nakrátko, konstrukčním uspořádáním transformátoru a vstupními a výstupními parametry transformátoru. Z těchto parametrů určíme jednotlivé izolační vzdálenosti. Můžeme také s dostatečnou přesností odhadnout koeficienty plnění, přídavných ztrát či zakrytí chladících ploch z druhů užitých vodičů a typu vinutí. Pro výpočet je též stěžejní maximální povolené oteplení jednotlivých částí transformátoru. Tyto hodnoty nalezneme v příslušných normách².

Zbylé parametry transformátoru je již možné dopočítat pomocí vztahů z teorie elektrických strojů. Problémem tak zůstává pouze volba určitých základních parametrů pro výpočet. Úloha totiž není jednoznačná – pokud například zvolíme úzké vinutí, budeme muset zvětšit celkovou výšku vinutí a tím ovlivníme i velikost magnetického obvodu. Za účelem nalezení vhodného řešení (tj. v našem případě nejlevnějšího) vytvoříme program, jenž na základě zmíněných parametrů propočítá všechny možné varianty a vybere právě tu, která bude splňovat daná kritéria.

Hlavní kostra programu se bude sestávat z několika vnořených cyklů, při kterých se vypočítají požadované parametry v celém určeném rozsahu základních parametrů. Spočtené hodnoty se na konci cyklu porovnají s předem danými kritérii (oteplení, maximální výška vinutí) a pokud vyhoví, uloží se základní parametry a cena varianty do pomocných proměnných. V dalším kroku se změní základní parametry a program opět dopočítá požadované hodnoty a porovná je s kritérii. V kladném případě se porovná cena této varianty s cenou varianty předchozí. Pokud bude cena nižší, přepíše se pomocné proměnné základních parametrů. Program bude takto pokračovat, dokud neprojde celý rozsah základních parametrů.

Vraťme se k problému určení základních parametrů pro výpočet transformátoru. Při výpočtech transformátorů se často začíná určením počtu závitů jednotlivých vinutí. Vzhledem k tomu, že známe vstupní a výstupní parametry transformátoru, postačí nám určit magnetický tok Φ v napěťové rovnici transformátoru (viz vztah 5 níže), z níž následovně určíme počet závitů vinutí. Magnetický tok je závislý na průřezu magnetického jádra transformátoru a jeho sycení. Zvolme tak tyto dvě veličiny jako základní parametry pro výpočet.

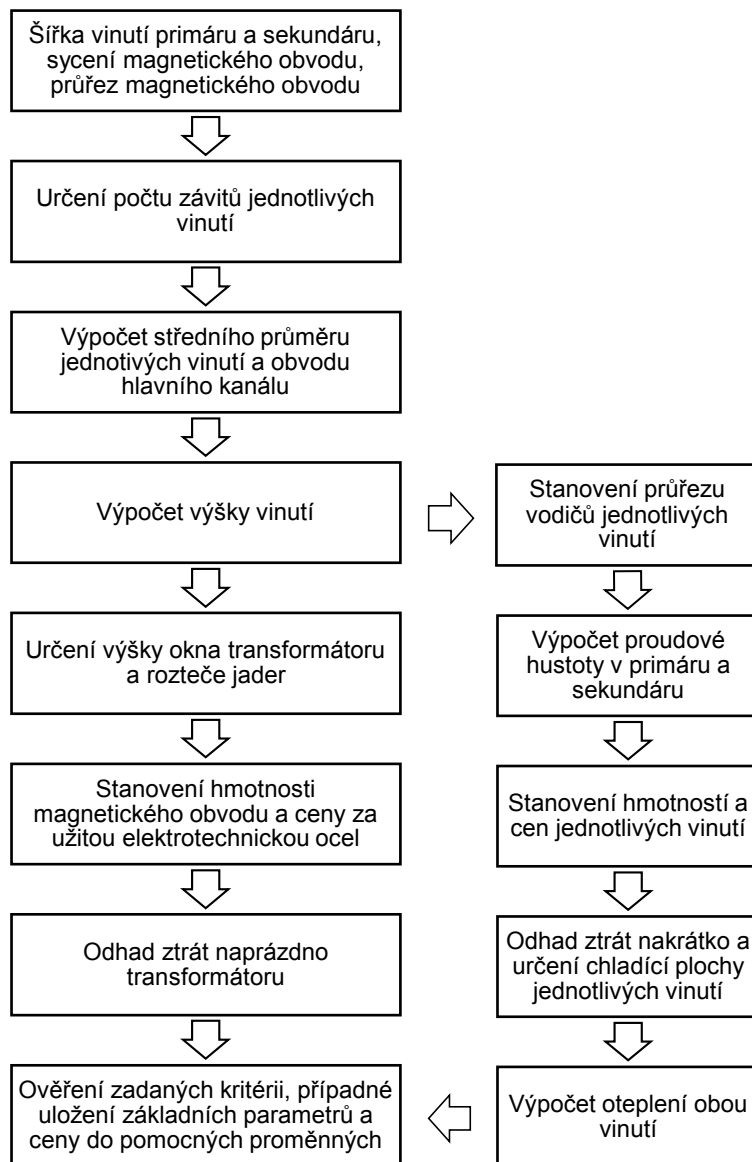
Se znalostí počtu závitů můžeme postoupit k výpočtu rozměrů vinutí. Vzhledem k vstupním a výstupním parametrům můžeme určit izolační vzdálenosti mezi vinutími, mezi

² ČSN EN 60076-2

vinutím a magnetickým obvodem a také mezizávitovou izolaci. Zbývají nám tedy 2 proměnné velikosti, a to šířka vinutí a výška vinutí. Výšku vinutí lze relativně snadno dopočítat úpravou vztahu pro vyjádření³ napětí nakrátko (viz vztah 30 níže), a proto jako základní parametr zvolíme šířku vinutí.

Podrobný popis postupu výpočtu včetně fyzikálních vzorců bude uveden v podkapitole 2.2. Vývojový diagram tohoto programu je znázorněn na obr. 1.

Program sepsaný v programovacím jazyce Java je součástí elektronických příloh.



Obr. 1 – Vývojový diagram výpočtového programu pro návrh transformátoru

³ Tento výpočet vyžaduje znalost počtu závitů N .

2 Detailní elektromagnetický návrh transformátoru pro zvolené varianty

2.1 Technické parametry obou řešení

Popišme nejprve společné charakteristiky obou řešení. Vzhledem k požadavkům na výstupní napětí musíme v obou případech použít kromě vlastního transformátoru i usměřovač. Usměřovač bude logicky umístěn na výstupní straně transformátoru. Jelikož pracujeme s poměrně nízkým výkonem (v oboru elektroenergetiky) a s kapacitní zátěží⁴, použijeme jednofázový transformátor a tedy i jednofázový usměřovač. Nejčastěji se používá jednofázový usměřovač můstkového typu (tzv. Grätzovo zapojení). Při usměřování dochází ke změně hodnoty napětí – střední hodnota usměrněného výstupního napětí je přibližně o 10 % nižší než efektivní hodnota střídavého napětí na vstupu. Výstupní napětí transformátoru tedy bude muset být o něco vyšší než požadované napětí pro odlučovač.

Magnetický obvod vlastního transformátoru bude tvořen dvěma sloupkami a dvěma spojkami. Obvod bude vyroben z plechů pro elektrotechniku, které budou skládány přeplátovaně. Vlastnosti těchto plechů probereme později.

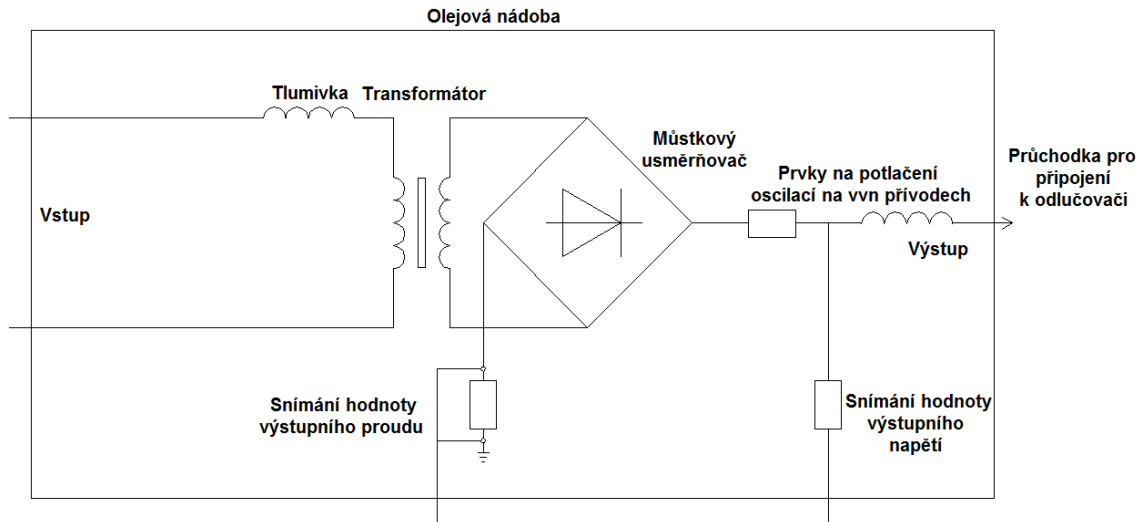
Na sloupcích budou umístěna jednoduchá koaxiální vinutí. Vodiče budou navjány spojitě na primárním i sekundárním vinutí. Na nízké napětí se použijí vodiče obdélníkového průřezu a na vysoké napětí vodiče kruhového průřezu. Vinutí budou rozdělena na 2 poloviny zapojené do série a každá polovina bude umístěna na jiném sloupcu.

Transformátor a usměřovač budou umístěny uvnitř společné olejové nádoby. Chladícím médiem bude minerální transformátorový olej. Cirkulace chladiva bude přirozená; olej se zahřeje v prostoru u vinutí a vlivem snížené hustoty se bude pohybovat směrem nahoru ke stěně nádoby, kde dojde k tepelné výměně a postupnému ochlazení oleje a tedy i jeho návratu do spodních vrstev. Externím chladícím bude vzduch a jeho cirkulace bude též přirozená (nádobu nebudeme ničím ofukovat). Technicky se tedy bude jednat o chladicí systém typu ONAN⁵.

Podrobný návrh nádoby a usměřovače není součástí této práce – u usměřovače se omezíme pouze na změnu napětí a u nádoby určíme pouze její povrch. Uspořádání komponentů uvnitř olejové nádoby je na obr. 1. V obrázku je zahrnuta i tlumivka pro druhou variantu řešení, v první variantě se logicky neobjeví.

⁴ Elektrické pole mezi elektrodami se chová jako kondenzátor – zátěž je tedy majoritně kapacitního charakteru

⁵ ONAN: O – interní chladicí médium je kapalina s bodem varu nižším nebo rovným 300 °C; N – interní chladicí médium cirkuluje přirozeně (nenuceně); A – externím chladícím médiem je vzduch; N – externí chladicí médium cirkuluje přirozeně (nenuceně)



Obr. 1 – Zapojení komponentů zdroje odlučovače uvnitř olejové nádoby

Přejdeme nyní ke stanovení jmenovitých hodnot transformátoru (štítku). V úvodu jsme se zmínili o tom, že vstupní jmenovité napětí transformátoru (odlučovače) bývá vzhledem k nižšímu výkonu těchto strojů relativně nízké. Použijme tedy přímo napětí sítě nízkého napětí: 400 V. Výstupní jmenovité napětí by se mělo pohybovat v rozsahu (10 ÷ 150) kV. Inspirujme⁶ se firmou ČKD a zvolme výstupní jmenovité napětí naprázdno odlučovače 150 kV. Výstupní jmenovité napětí transformátoru pak bude kvůli odlučovači 166,7 kV.

Inspirujme se i v případě stanovení proudu. Vezměme jmenovitou hodnotu výstupního stejnosměrného proudu 1 250 mA. Vstupní jmenovitou hodnotu proudu pak můžeme snadno určit pomocí převodu transformátoru⁷ jako 521 A.

Součinem příslušného napětí a proudu na jednom vinutí pak můžeme dopočítat jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru 208,4 kVA.

Mimo jiné jsme také uvedli, že poměrná reaktance soustavy bude rovna 40 %. V případě zapojení reaktor – transformátor bude napětí nakrátko transformátoru 10 %, v případě samotného transformátoru logicky 40 %.

S ohledem na užití vodiče a napětí jednotlivých vinutí můžeme určit i další vlastnosti transformátoru. V případě určení izolačních vzdáleností (rozměrů chladících kanálků) budeme vycházet z poznatků z praxe, v případě stanovení různých koeficientů a činitelů provedeme kvalifikovaný odhad.

Začneme s odhadem činitelů a koeficientů. Uvedli jsme, že primární vinutí bude tvořeno vodiči obdélníkového průřezu. Malý počet závitů a velký proud vedou k velkému průřezu

⁶ <http://www.ckde.cz/translate/cs/company-detail/ckd-elektrotechnika/ckd-elektrotechnika/vvn-zdroje-pro-elektrostaticke-odluco-vace/185>

⁷ V případě nezátíženého ideálního transformátoru platí $I_2/I_1 = N_1/N_2$

vodičů. Vodiče o průřezu 6 mm^2 a více se vyrábějí zpravidla pouze jen v obdélníkovém provedení. Ve skutečnosti však průřez není dokonalý obdélník – kvůli snížení gradientu elektrického pole se jeho rohy zaoblují. Poloměr zaoblení bývá velmi malý v porovnání se šířkou a výškou vodiče. Díky nízkému napětí bývá tloušťka izolační vrstvy velmi malá, v praxi se používá tenká vrstva papírové (kabelové) či lakové izolace. Vytvoříme-li z těchto vodičů nějaké pomyslné vinutí, uvidíme, že vlastní vodivá část (měď) tohoto vodiče bude tvořit velkou část celého průřezu vinutí. Poměr mezi průřezem vodivé části vinutí a celkovým průřezem vinutí nazýváme činitel plnění (mědi). Obdélníkový vodič mívá zpravidla vysoký činitel plnění, zvolme tedy hodnotu 0,8.

Sekundární vinutí bude tvořeno vodiči kruhového průřezu. Zde bude naopak velmi vysoký počet závitů a nízký proud, a proto bude průřez vodičů velmi malý. Pro takto malé průřezy se vyrábějí pouze vodiče kruhového průřezu. Izolace těchto vodičů bude laková a její tloušťka již nebude zanedbatelná. Mezi každé dvě vrstvy vodiče se navíc vyvíjí několik ovinů kabelového vodiče, aby byla zachována mechanická pevnost soustavy (aby vodič z jedné vrstvy „nepropadl“ do vrstvy jiné) při následném stlačení při montáži. Mezi vrstvami navíc vznikají ničím nezaplňené prostory kvůli kruhovému tvaru vodičů. Všechny tyto specifika výrazně snižují činitel plnění; pracujme tedy s hodnotou 0,4.

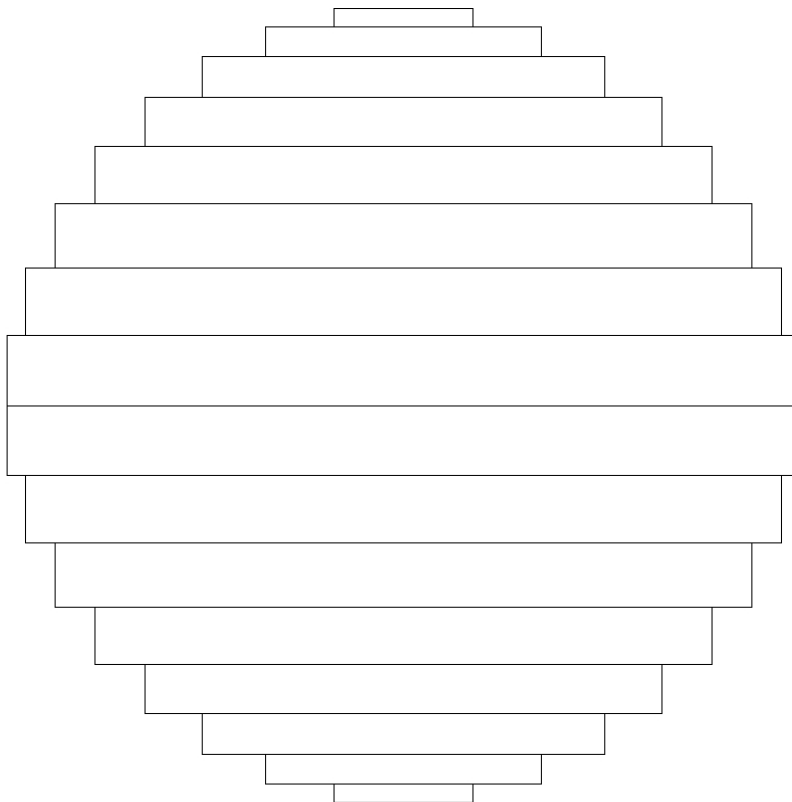
Z principu funkce musí být transformátor napájen střídavým proudem (napětím; v našem případě bude frekvence 50 Hz). Střídavý průběh proudu s sebou přináší několik negativních fenoménů – nás bude zajímat především tzv. skin effect. Vlivem střídavého magnetického pole se ve vodiči vytvářejí vířivé proudy, které vytlačují část proudu, který by protékal místem blíže ke středu, směrem k okraji vodiče. Kvůli tomu je proudová hustota u krajů vodiče vyšší, a tudíž zde vznikají i větší Jouleovo ztráty⁸. Ve výpočtech zohledňujeme tento jev koeficientem přídatných ztrát. Na primárním vinutí budeme počítat s koeficientem přídatných ztrát 1,25, na sekundárním vinutí kvůli nižšímu proudu pak pouze 1,15.

Chceme-li stanovit hmotnost užitých vodičů (a tedy i jejich cenu), musíme určit koeficient přídatné hmotnosti. Výpočtem totiž dokážeme určit jen hmotnost vodičů uvnitř vinutí; hmotnost mědi spotřebované na přívody k vinutím, propojení polovin vinutí a přídatné závitů vinutí musíme odhadnout. V praxi se často uvažuje s hodnotou 1,1, a proto jí také použijeme.

Cívky budou mít vzhledem k jejich velikosti kruhový tvar (při pohledu seshora; pro větší rozměry se snadněji navíjí právě tento tvar), a proto budeme požadovat i kruhový tvar magnetického obvodu. Nebudou nám tak vznikat zbytečné prázdné prostory a celý stroj bude moci být menší. V praxi je však požadavek na dokonalý kruhový tvar nespílitelný – magnetický obvod se musí skládat z tenkých plechů o malé tloušťce, které se pokládají na

⁸ Jouleovo ztráty jsou přímo úměrné kvadrátu proudové hustoty – nerovnoměrné rozložení tedy způsobuje celkově větší ztráty

sebe. Při výrobě transformátoru pak záleží na celkovém počtu „stupňů“ šířek plechů. Čím větší je toto číslo, tím více se magnetický obvod blíží kruhovému průřezu. Činitel plnění železa je pak dán jako poměr skutečného průřezu magnetického obvodu proti ideálnímu obvodu (s kruhovým průřezem). V našem případě budeme pracovat s hodnotou 0,9. Příklad magnetického obvodu s kruhovým průřezem je na obr. 2.



Obr. 2 – „Kruhový“ průřez magnetického obvodu (konkrétní případ pro 8 stupňů šířek plechů)

Poslední koeficient, který jsme ještě schopni odhadnout, je koeficient zakrytí chladičích ploch. Z technologických důvodů musí být mezi vinutími umístěny izolační lišty, které zajišťují mechanickou pevnost soustavy. Tyto lišty zakrývají v některých částech vinutí a zhoršují odvod tepla. V praxi se hodnota tohoto koeficientu pohybuje v rozmezí $0,7 \div 0,8$, v našem případě zvolme hodnotu 0,75.

Přejdeme nyní k určení velikostí kanálků a izolačních vzdáleností. Velikost kanálku u jádra je dána požadavkem na odvod tepla z vinutí a na hodnotu intenzity elektrického pole mezi vinutím a magnetickým jádrem. V našem případě je bližší vinutí nízkonapěťové (400 V), a tak nám postačí malá šířka kanálku. Budeme tedy pracovat s kanálkem o šířce 10 mm, jenž bude splňovat jak požadavek na odvod tepla (≥ 6 mm), tak i na intenzitu elektrického pole.

Šířka hlavního kanálu (tj. kanál mezi vinutími) je podobně jako u kanálu u jádra určena požadavky na chlazení vinutí a na hodnotu intenzity elektrického pole. Menší olejové kanálky

dovolují větší intenzitu elektrického pole, a proto do kanálu vložíme několik vrstev (válců) elektrotechnické lepenky⁹. Rozložení vrstev oleje a lepenky je nutné navrhnout s ohledem na zkoušku indukovaným napětím (testovací napětí 200 kV v našem případě). Okrajové vrstvy oleje budou mít šířku 6 mm (minimální hodnota pro odvod tepla, užší kanálek má větší elektrickou pevnost) a ostatní vrstvy 8 mm. Lepenkové válce budou mít šířku 4 mm. Intenzita elektrického pole, při které se začínají v oleji vyskytovat částečné výboje, je pro tyto šířky přibližně 9 kV/mm; v běžném provozním stavu požadujeme intenzitu elektrického pole v oleji menší než 70 % této hodnoty. Podle výpočtu vychází šířka hlavního kanálu na 52 mm [4].

Kanál mezi fázemi (název vychází z konstrukce trojfázových transformátorů, jedná se o kanál mezi vzdálenými konci vysokonapěťových vinutí) by měl velikostně přibližně odpovídat hlavnímu kanálu – při sériovém zapojení obou polovin vinutí se mezi počátkem jedné poloviny a koncem druhé poloviny vytvoří plné napětí sekundáru, tudíž opět vzniká silné elektrické pole a je nutno s ním počítat. Šířka tohoto kanálu jsme stanovili obdobně jako šířku hlavního kanálu, tedy 52 mm.

Horní a dolní koncová vzdálenost je opět podmíněna nároky na izolaci při zkoušce indukovaným napětím. Určení této vzdálenosti vychází z poznatků z technické praxe. V našem případě jsme interpolovali známé koncové vzdálenosti v závislosti na zkušební napětí (graf A2) a získali požadovanou koncovou vzdálenost 105 mm [4].

Ztrátové číslo železa je garantováno výrobcem a pomocí něj určujeme ztrátu naprázdno. V našem případě¹⁰ se ztrátové číslo pohybuje v rozmezí (1,05 ÷ 1,53) W/kg při sycení $B_{\max} = 1,7$ T. Přepočítáním (viz vztah (36)) a zprůměrováním těchto hodnot jsme určili ztrátové číslo jako 1,1 W/kg při sycení $B_{\max} = 1,5$ T. Je vhodné poznamenat, že použité plechy pro elektrotechniku jsou válcovány za studena, tudíž jsou anizotropické z hlediska ztrát magnetickým polem. Díky této anizotropii (směr válcování a magnetizace je shodný) pracujeme s menším ztrátovým číslem, než bychom získali s plechy válcovanými za tepla. Tloušťka těchto plechů je 0,35 mm.

Pro lepší odvod tepla jsme zvolili dvě polohy každého vinutí. Mezi těmito polohami bude olejový kanálek o tloušťce 6 mm. Přítomnost kanálku mírně ovlivní průběh indukce magnetického rozptylového pole uvnitř vinutí a pro další výpočty bude nutné s tímto faktem uvažovat.

Závěrem ještě stanovme kritéria, o kterých jsme se zmínili v kapitole 1. Každý elektrický stroj má izolaci, která spadá do určité teplotní třídy. V případě transformátorů se používá

⁹ Elektrotechnická lepenka - <http://www.obzor.cz/files/files/obzortesneni.pdf>

¹⁰ Plechy pro elektrotechniku - http://www.alibaba.com/product-detail/Electrical-Grain-Oriented-Steel-CRGO_113778396.html

izolace teplotní třídy A – maximální povolená provozní teplota izolantu je tak 105 °C. V normách ČSN EN jsou pak stanovena maximální oteplení jednotlivých částí transformátorů s ohledem na stárnutí izolantu vlivem teploty. Pro výkonové transformátory platí norma ČSN EN 60076-2, která stanovuje hodnoty maximálního oteplení vinutí a oleje pro různé chladicí systémy. Pro naše chlazení typu ONAN platí: maximální střední oteplení vinutí 65 K, maximální oteplení hot spotu vinutí 78 K a maximální oteplení chladicí kapaliny v horní vrstvě 60 K. Oteplení se stanovuje vůči externímu chladicímu médium – v našem případě tedy vzduchu. U tohoto média se uvažuje s průměrnou celoroční teplotou 20 °C.

Pro ztrátové omezení musíme vyjít ze ztrát běžných distribučních transformátorů o podobném výkonu. Ztráty¹¹ nakrátko distribučních transformátorů o výkonu 250 kVA se pohybují okolo 2500 W, přičemž ztráty naprázdno bývají pro stejný výkon 250 W. Nároky na převod a na napětí nakrátko našeho transformátoru jsou ovšem značně větší než nároky kladené na distribuční transformátor, a proto budou logicky i naše ztráty větší. Pracujme tedy s dvojnásobnou hodnotou maximálních ztrát: nakrátko 5 000 W a naprázdno 500 W.

Výška vinutí a šířky poloh by se měly pohybovat v rozumných mezích, aby bylo vůbec možné transformátor vyrobit a aby mechanická pevnost jednotlivých částí nebyla příliš malá. Určíme rozsah výšky vinutí jako (250 ÷ 700) mm a rozsah šířky polohy vinutí jako (5 ÷ 20) mm.

Pokud tedy náš výpočtový program, který jsme popsali v kapitole 1, splní tyto kritéria, vypočítá i celkovou cenu varianty. Optimální návrh z hlediska ceny poté převedeme do proveditelné varianty – dohledáme skutečné vodiče, které budou co nejvíce odpovídat našemu idealizovanému návrhu a výpočet provedeme znovu, již s vypočtenými koeficienty (nebude se jednat pouze o odhad).

Veškeré veličiny určené v této podkapitole jsou zapsány v tabulce 1.

¹¹ http://www.bez.sk/public/data/katalogove_listy/107e.pdf

Tab 1. Parametry pro návrh transformátoru

Veličina	Hodnota	
	(na primárním vinutí)	(na sekundárním vinutí)
Jmenovitý zdánlivý výkon	208,4 kVA	208,4 kVA
Jmenovité napětí	400 V	166,7 kV
Fázový proud	521 A	1,25 A
Počet poloh vinutí	2	2
Činitel plnění vinutí	0,8	0,4
Koeficient přidavných ztrát	1,25	1,15
Koeficient přidavné hmotnosti	1,1	1,1
Kanál mezi polohami	6 mm	6 mm
Maximální hodnota středního oteplení vinutí (hot spot vinutí)	65 K (78 K)	65 K (78 K)
Maximální oteplení oleje v horní vrstvě	60 K	
Kanál u jádra	10 mm	
Hlavní kanál ¹²	52 mm	
Kanál mezi fázemi	52 mm	
Dolní koncová vzdálenost	105 mm	
Horní koncová vzdálenost	105 mm	
Ztrátové číslo železa (1,5 T)	1,1 W/kg	
Činitel plnění železa	0,9	
Poměrná rozptylová reaktance	0,1/0,4	
Koeficient zakrytí chladicí plochy	0,75	
Frekvence napětí	50 Hz	

¹² Šířka vychází z maximální povolené intenzity elektrického pole uvnitř kanálu

2.2 Teoretické vztahy pro výpočet parametrů transformátoru

Při znalosti veličin uvedených v podkapitole 2.1 nám postačí využít poznatky z teorie elektrických strojů k dopočítání požadovaných vlastností transformátoru. Jako první nás bude zajímat počet závitů na obou vinutích. Pro tento výpočet budeme vycházet ze zákona elektromagnetické indukce pro cívku s N závitů.

$$u_i(t) = N \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (1)$$

V tomto vztahu určíme okamžitý magnetický tok $\Phi(t)$ pomocí goniometrické funkce a maximální hodnoty magnetického toku. Předpokladem pro tento krok je harmonický průběh napětí; v našem případě tuto podmínku napětí ze sítě splňuje.

$$\Phi(t) = \Phi_m \cdot \sin(\omega t) \quad (2)$$

Z tohoto výrazu vyjádříme derivaci magnetického toku jako:

$$\frac{d\Phi(t)}{dt} = \Phi_m \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \quad (3)$$

Nyní můžeme dosazením rovnice (3) do rovnice (1) vyjádřit okamžitou hodnotu indukovaného napětí jako:

$$u_i(t) = N \cdot \Phi_m \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \quad (4)$$

Abychom mohli vyjádřit efektivní hodnotu indukovaného napětí, musíme nejprve určit amplitudu vztahu (4). Na to nám postačí pouze znalost maximální hodnoty goniometrické funkce cosinus:

$$U_{i,m} = N \cdot \Phi_m \cdot \omega \quad (5)$$

Stanovme ještě efektivní hodnotu indukovaného napětí. Při harmonickém průběhu veličin je poměr mezi maximální a efektivní hodnotou roven $\sqrt{2}$. Ve vztahu (5) vyjádříme úhlovou rychlost ω z její definice pomocí frekvence. Získáme tak vztah:

$$U_{i,ef} = \frac{2\pi \cdot f \cdot N \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}} \cong 4,44 \cdot f \cdot \Phi_m \cdot N \quad (6)$$

Pro naše potřeby již stačí vyjádřit maximální hodnotu magnetického toku a tu získáme z definice magnetického toku.

$$\Phi = \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (7)$$

V našem případě¹³ bude magnetický tok roven

$$\Phi_m = B_j \cdot S_j \quad (8)$$

Magnetický tok je volen s ohledem na vlastnosti materiálu magnetického obvodu. Nemělo by docházet k přesycení obvodu. Magnetický tok také ovlivňuje ztráty naprázdno a mělo by se s tím při jeho volbě uvažovat.

Dosazením rovnice (8) do rovnice (6) a následnou úpravou získáme konečný vztah pro počet závitů N

$$N = \frac{U_{i,ef}}{4,44 \cdot f \cdot B_j \cdot S_j} \quad (9)$$

Se známými počty závitů můžeme postoupit ke stanovení výšky vinutí. Pro tuto úlohu musíme nejprve vyjádřit napětí nakrátko (též poměrnou rozptylovou reaktanci) a pomocí něj následovně vypočítat výšku cívky (vinutí) l_c .

Z definice odpovídá napětí nakrátko hodnotě napětí, které je při jmenovité frekvenci nutné přivést na jedno vinutí transformátoru (druhé vinutí je na svorkách spojeno nakrátko) tak, aby oběma vinutími protékaly příslušné jmenovité proudy. Zpětně tedy můžeme tvrdit, že průtok jmenovitých proudů transformátorem vytváří na jeho impedanci z úbytek napětí roven napětí nakrátko. Z tohoto důvodu můžeme rozdělit napětí nakrátko na složku činnou a jalovou jako [5]:

$$u_K = \sqrt{u_R^2 + u_L^2} \quad (10)$$

Činná složka napětí nakrátko uvažuje činný odpor vinutí se zřetelem na ztráty ve vývodech, železných částech a vinutích, včetně přídavných ztrát. Její hodnota se uvádí v procentech a je dána vztahem [5]:

$$u_R = \frac{R_K \cdot I_N}{U_N} \cdot 100 = \frac{R_K \cdot I_N \cdot I_N}{U_N \cdot I_N} \cdot 100 = \frac{\Delta P_K}{P_N} \cdot 100 \quad (11)$$

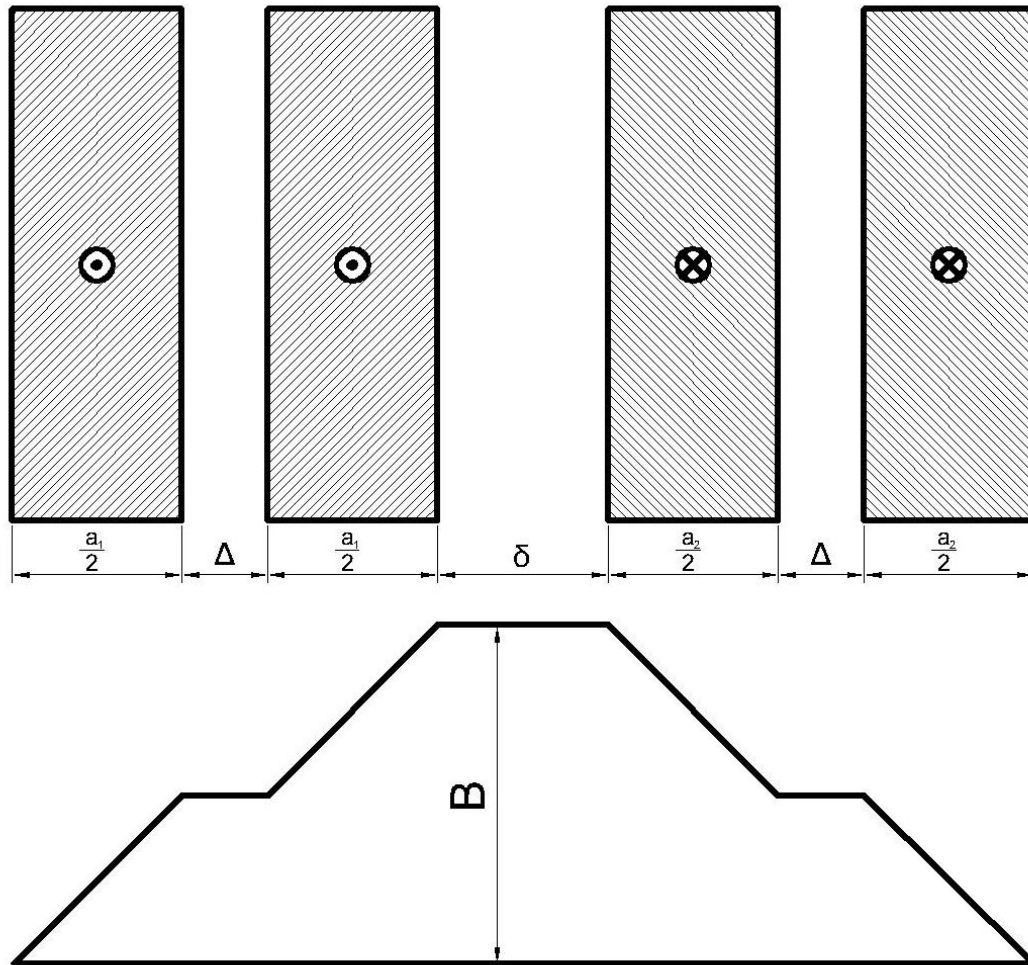
¹³ Uvažujeme konstantní průřez jádra v celém obvodu a směr vektoru magnetické indukce totožný s normálou plochy průřezu jádra.

Tato složka bývá zpravidla velmi malá ve srovnání s jalovou složkou. Navíc při výpočtu napětí nakrátko se tyto dvě složky geometricky sčítají, a tudíž je její vliv na velikost napětí nakrátko ještě menší. V našich výpočtech tedy budeme tuto složku zanedbávat.

Indukované napětí obou vinutí vycházejí z napěťové rovnice pro elektrické stroje. Na svorkách sekundárního vinutí (tj. vinutí, které není napájené) ovšem vzniká určitý úbytek napětí. Tento úbytek napětí odpovídá napětí, které by vzniklo na fiktivní reaktanci X (jalové složce impedance nakrátko). Induktivní složka napětí nakrátko se opět uvádí v procentech a je vyjádřena vztahem [5]:

$$u_L = \frac{X \cdot I}{U} \cdot 100 \quad (12)$$

Pro určení velikosti naší fiktivní reaktance musíme vycházet z tvaru rozptylového magnetického pole soustředného vinutí. Uvažujeme dvě vinutí o šířce a_1 a a_2 , které jsou od sebe odděleny hlavním kanálem o šířce δ . Při analýze uvažujeme, že všechny siločáry jsou stejně dlouhé a rovnoměrně rozložené; magnetická indukce B tak vzrůstá rovnoměrně od kraje vinutí směrem k hlavnímu kanálu do hodnoty B_m . Magnetická indukce je v hlavním kanálu konstantní, její celkový průběh má pak tedy tvar lichoběžníku (viz obr. 3, případ s vertikálními chladícími kanálky) [5].



Obr. 3 – Průběh magnetické indukce v prostoru uvnitř a mezi vinutími

Skutečnou hodnotu rozptylové reaktance bychom zjistili zkouškou nakrátko, pro naši analýzu nám postačí vycházet ze vztahu:

$$X_K = X_1 + X_{21} = \omega \left(L_{\sigma_1} + \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot L_{\sigma_2} \right) = \omega L_K \quad (13)$$

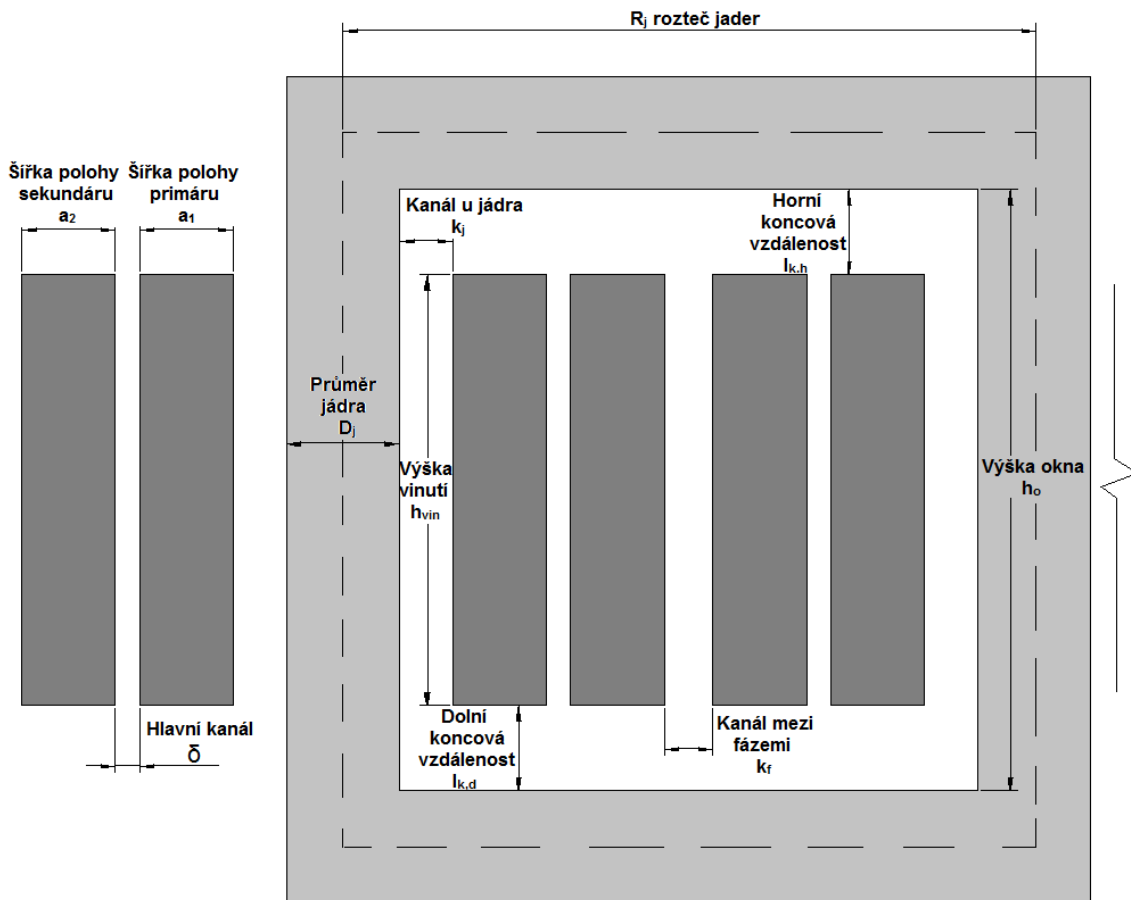
Pro celkovou energii rozptylového magnetického pole pak platí:

$$A_\sigma = \frac{L_K \cdot I_K^2}{2} \quad (14)$$

Z tohoto vztahu lze pak vyjádřit indukčnost transformátoru při zapojení nakrátko jako:

$$L_K = \frac{2A_\sigma}{I_K^2} \quad (15)$$

V další části odvození bude nutné pracovat s rozměry transformátoru. Pro zjednodušení jsou na obr. 4 vyznačeny jednotlivé rozměry včetně jejich zkratk.



Obr. 4 – Rozměrové veličiny transformátoru včetně jejich označení

Pro výpočet energie rozptylového elektromagnetického pole potřebujeme matematicky popsat průběh indukce B v libovolném bodě ve vzdálenosti x od okraje cívky. Úpravou Ampérova zákona celkového proudu (v našem případě lze zjednodušit¹⁴ na: $H \cdot l = N \cdot I$) získáme vztah:

$$\frac{B_x}{\mu} \cdot l_s = I_K \cdot N \frac{x}{a_1} \quad (16)$$

Se vzrůstající vzdáleností od okraje cívky se magnetická indukce B_x lineárně zvětšuje až do B_m při $x = a_1$. Pro B_x v libovolném místě cívky široké a_1 platí:

$$B_x = \mu_{Cu} \cdot \frac{I_K \cdot N}{l_s} \cdot \frac{x}{a_1} \quad (17)$$

¹⁴ Uvažujeme stejný směr a velikost vektoru intenzity magnetického pole po celé délce (resp. výšce) siločáry.

V hlavním kanálu je průběh indukce stálý; nemění se totiž počet závitů, kterými protéká proud. Konstantní hodnota indukce B pak bude dána vztahem:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{I_K \cdot N}{l_s} \quad (18)$$

Ve všech rovnicích značí l_s střední délku silové čáry uprostřed celého prostoru cívek. Tato délka je podle prací W. Rogowského trochu větší než samotná výška vinutí [5].

Energii rozptylového magnetického pole A_σ určíme ze vztahu:

$$A_\sigma = \frac{1}{2} \int_{V_\sigma} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} dV_\sigma \quad (19)$$

Magnetickou indukci B uvažujeme pro objem rozptylového pole cívek

$$V_\sigma = \pi \cdot D_{\text{str}} \cdot (a_1 + \delta + a_2) \cdot l_s \quad (20)$$

Energie rozptylového magnetického pole je po integrování a úpravě¹⁵:

$$A_\sigma = \frac{1}{2\mu_0} \cdot B_{\text{stř}}^2 \cdot V_\sigma \quad (21)$$

Pokud pro lichoběžníkový průběh magnetické indukce vezmeme v úvahu druhou mocninu (dáno součinem $H \cdot B$) magnetické indukce, bude její průběh v oblasti vinutí parabolický, mezi vinutími pak konstantní o hodnotě B^2 . Plochu ohraničenou průběhem B^2 pak můžeme přeměnit na obdélník o výšce B^2 a o šířce dané součtem třetin¹⁶ šířek jednotlivých vinutí a šířky hlavního kanálu. Platí tedy rovnost ploch

$$\left(\frac{a_1}{3} + \delta + \frac{a_2}{3}\right) \cdot B^2 = (a_1 + \delta + a_2) \cdot B_{\text{stř}}^2 \quad (22)$$

a z ní můžeme vyjádřit střední hodnotu magnetické indukce jako:

$$B_{\text{stř}}^2 = B^2 \cdot \left(\frac{\delta + \frac{a_1 + a_2}{3}}{a_1 + \delta + a_2}\right) \quad (23)$$

¹⁵ Rozptylové magnetické pole uvažujeme mimo magnetický obvod. V našem případě se jedná o prostor vinutí a o prostor vyplněný olejem. V obou případech je relativní permeabilita téměř rovna 1 a tak můžeme její vliv zanedbat.

¹⁶ Dáno parabolickým průběhem magnetické indukce v oblasti vinutí. Plocha pod parabolou odpovídá 1/3 obsahu obdélníku, jenž prochází počátečním a koncovým bodem myšlené části paraboly.

Pokud dosadíme rovnice (18), (20), (21) a (23) do rovnice (15), získáme po úpravě vztah:

$$L_K = \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot D_{\text{stř}} \cdot N^2}{l_s} \cdot \left(\vartheta + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \quad (24)$$

Kde:

$$D_{\text{stř},1} = D_j + 2k_j + a_1 \quad (25)$$

$$D_{\text{stř},2} = D_{\text{stř},1} + a_1 + 2\delta + a_2 \quad (26)$$

Podle rovnice (12) pak získáme vztah pro reaktanci nakrátko:

$$X_K = 2\pi f \cdot \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot D_{\text{stř}} \cdot N^2}{l_s} \cdot \left(\vartheta + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \quad (27)$$

Tento vztah upravíme na používanější formu pro procentuální hodnoty podle rovnice (11). Přitom zavedeme místo celkového napětí na vinutí často používanou veličinu při navrhování transformátorů – napětí na závit¹⁷ u_N . Po úpravě získáme výraz pro induktivní složku napětí nakrátko [5]:

$$u_L = \frac{7,9 \cdot f \cdot N \cdot I \cdot \pi \cdot D_{\text{stř}}}{u_N \cdot l_s \cdot 10^6} \cdot \left(\vartheta + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \quad (28)$$

Výraz v závorce v rovnici (25) označujeme jako redukovaná šířka vinutí s . Koeficient¹⁸ 7,9 často zaokrouhlujeme na 8 a tak počítáme s hodnotou vyšší přibližně o 1,5 %. Poté platí pro u_L vztah [5]:

$$u_L = \frac{8 \cdot f \cdot N \cdot I \cdot \pi \cdot D_{\text{stř}} \cdot s}{u_N \cdot l_s \cdot 10^6} \quad (29)$$

V rovnici (26) je ještě nutné určit délku rozptylové čáry l_s . W. Rogowski určil ve své práci¹⁹ poměr mezi délkou rozptylové čáry a rozměry vinutí jako [5]:

$$l_s = \frac{l_c}{K_R} \quad (30)$$

¹⁷ Definováno pro příslušné vinutí vztahem $u_N = U/N$.

¹⁸ Koeficient vznikl z rovnice (16) jako $2\pi\mu_0 = 7,88 \cdot 10^{-8}$, exponent byl převeden do jmenovatele.

¹⁹ Rogowski, W., "Über das Streufeld und den Streuinduktionskoeffizienten eines Transformators mit Scheibenwicklung und geteilten Endspulen"

Činitel K_R je redukční činitel výšky cívky. Pro běžné²⁰ izolační vzdálenosti cívek od magnetického obvodu je:

$$K_R = 1 - \frac{1}{\pi \cdot \kappa} \cdot (1 - e^{-\pi\kappa}) = 1 - \frac{1}{\pi \cdot \kappa} + \frac{1}{\pi \cdot \kappa \cdot e^{-\pi\kappa}} \quad (31)$$

kde²¹

$$\kappa = \frac{l_c}{a_1 + \delta + a_2} \quad (32)$$

Dosazením rovnice (30) do rovnice (29) získáme konečný vztah pro indukční složku napětí nakrátko

$$u_L = \frac{8 \cdot f \cdot N \cdot I \cdot \pi \cdot D_{stř} \cdot s \cdot K_R}{u_N \cdot l_c \cdot 10^6} \quad (33)$$

V mnoha případech je nutné rozdělit vinutí jedním nebo více vertikálními chladicími kanálky. V prostoru těchto kanálků je ale magnetická indukce konstantní, což má za následek změnu celkového průběhu magnetické indukce. Tento průběh již nebude mít lichoběžníkový tvar, a proto je nutné tuto změnu uvažovat při výpočtu indukční složky napětí nakrátko. Počítáme pak s redukovanou šířkou cívky, která je dána²² vztahem:

$$a_r = \frac{2}{3}a + \frac{\Delta}{4} \quad (34)$$

Pokud se chladicí kanálky nacházejí v obou vinutí a jsou stejně široké, celková redukovaná šířka vinutí je pak rovna

$$s = a_{1r} + \delta + a_{2r} \quad (35)$$

Pro výpočet výšky použijeme²³ upravenou rovnici (33) s vyjádřením výšky vinutí. Člen redukčního činitele výšky vinutí značně ztěžuje analytické vyjádření výšky vinutí kvůli obsahu členu výšky cívky v jeho definici. Navíc vzhledem k tomu, že hodnoty redukčního činitele výšky se pohybují v rozsahu (0,95 ÷ 0,99) [5], můžeme tento člen ve výpočtu ignorovat.

Se známou výškou cívky a hodnotami z tab. 1 již můžeme dopočítat všechny rozměry transformátoru. Nejprve určíme rozměry magnetického obvodu a následovně vypočítáme

²⁰ Konečné vzdálenosti jsou menší než výška cívky.

²¹ Rovnice platí za podmínky $\delta < 0,5 \cdot (a_1 + \delta + a_2) < 2$.

²² Vztah platí pro vinutí s jedním kanálkem o šířce Δ .

²³ Činná složka napětí nakrátko je oproti indukční složce zanedbatelná, pracujeme proto pouze se složkou indukční

jeho hmotnost. Ta nám poslouží ke stanovení ceny použité magnetické oceli a zároveň i ke stanovení ztrát naprázdno.

Určeme nejprve výšku okna transformátoru h_0 :

$$h_0 = l_c + l_{k,h} + l_{k,d} \quad (36)$$

Dalším rozměrem je rozteč jader R_j , kterou určíme z rozměrů jednotlivých kanálů a šířek vinutí pomocí vztahu:

$$R_j = d_j + 2 \cdot (k_j + a_1 + \delta + a_2) + k_f \quad (37)$$

Využitím elementárních vztahů²⁴ z fyziky jsme již schopni dopočítat²⁵ hmotnost magnetické oceli jako:

$$m_{Fe} = \rho_{Fe} (2h_0 + R_j + 2d_j) \cdot S_j \quad (38)$$

S určenou hmotností magnetického obvodu již můžeme dopočítat ztráty naprázdno. U oceli pro elektrotechniku se běžně udává ztrátové číslo pro sycení $B = 1,5$ T. V našich výpočtech uvažujeme i se sycením větším²⁶, a proto je nutné zavést člen respektující tento rozdíl. Ztráty naprázdno tak budou dány vztahem:

$$\Delta P_0 = p_{z,0} \cdot \left(\frac{B_j}{1,5} \right)^{1,3} \cdot m_{Fe} \quad (39)$$

Naším dalším krokem bude výpočet hmotnosti jednotlivých vinutí a ztrát nakrátko. Stanovme tedy nejprve průřez vodičů obou vinutí. Využijeme výšky cívky l_c , počtu závitů N a zadaných hodnot. Průřez jednoho vodiče vinutí tak bude dán vztahem:

$$S_{vin} = k_p \cdot \frac{a \cdot l_c}{N} \quad (40)$$

Se znalostí průřezu vodičů na jednotlivých vinutí a příslušného jmenovitého proudu můžeme dopočítat proudovou hustotu z úpravy zjednodušené definice²⁷ pomocí proudu jako:

$$J = \frac{I_n}{S_{vin}} \quad (41)$$

²⁴ Úprava fyzikální definice hustoty $\rho = m/V$.

²⁵ Průřez jádra je jedna z veličin, které necháváme cyklovat – její hodnotu tedy známe.

²⁶ Větší sycení vede k vyšším ztrátám – hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy jsou závislé na mocnině sycení $\sim (1,5 + 2)$.

²⁷ Směr vektoru proudové hustoty uvažujeme totožný se směrem normálového vektoru uvažované plochy.

Ztráty nakrátko jsou definovány jako ztrátový výkon vznikající při průchodu jmenovitého proudu jedním vinutím, přičemž druhé vinutí je na výstupu zkratované. Pro tento výpočet využijeme Jouleův zákon, jenž nám určí ztráty nakrátko v jednotkovém objemu vinutí. Tuto hodnotu pak pouze vynásobíme objemem a získáme tím celkové ztráty nakrátko našeho transformátoru.

Jouleovy ztráty odpovídají ztrátovému výkonu vodiče. Z definice je výkon závislý na vykonané práci. Obdobně je práce závislá na síle, kterou v našem případě definujeme pomocí náboje a intenzity elektrického pole jako:

$$F = Q \cdot E \quad (42)$$

Při stanovování vykonané práce bude vhodné užít infinitezimálního počtu – určením elementu vykonané práce a integrováním přes celý objem vinutí získáme celkovou hodnotu. Vyjádříme tedy element náboje dQ pomocí definice proudu a proudové hustoty jako:

$$dQ = Idt = JdSdt \quad (43)$$

Počítání s proudovou hustotou J bývá často výhodné, jelikož se o ní dá v mnoha případech uvažovat jako o konstantní v celém průřezu vodiče.

Užitím rovnic (42) a (43) můžeme vyjádřit element výše zmíněné vykonané práce:

$$dA = Fdl = dQE dl = JE dl dS dt = JE dV dt \quad (44)$$

Z této rovnice lze stanovit ztrátový výkon v elementu objemu dV jako:

$$P(dV) = \frac{dA}{dt} = JE dV \quad (45)$$

Ve vztahu (45) vyjádříme intenzitu elektrického pole E pomocí Ohmova zákona v diferenciální podobě²⁸ a určíme hodnotu ztrátového výkonu pro jednotkový objem ($V = 1$). Tím získáme vztah popisující Jouleův zákon:

$$P(V = 1) = \frac{P(dV)}{dV} = JE = \sigma E^2 = \frac{J^2}{\sigma} \quad (46)$$

Stanovme nyní celkovou hmotnost vinutí včetně přívodů a vodičů propojujících jednotlivé cívky. Tato hodnota nám poslouží k určení ceny použité mědi; pro určení ztrát využijeme pouze hmotnosti (objemu) jednotlivých cívek²⁹. Celková hmotnost je tedy:

²⁸ $J = \sigma \cdot E$

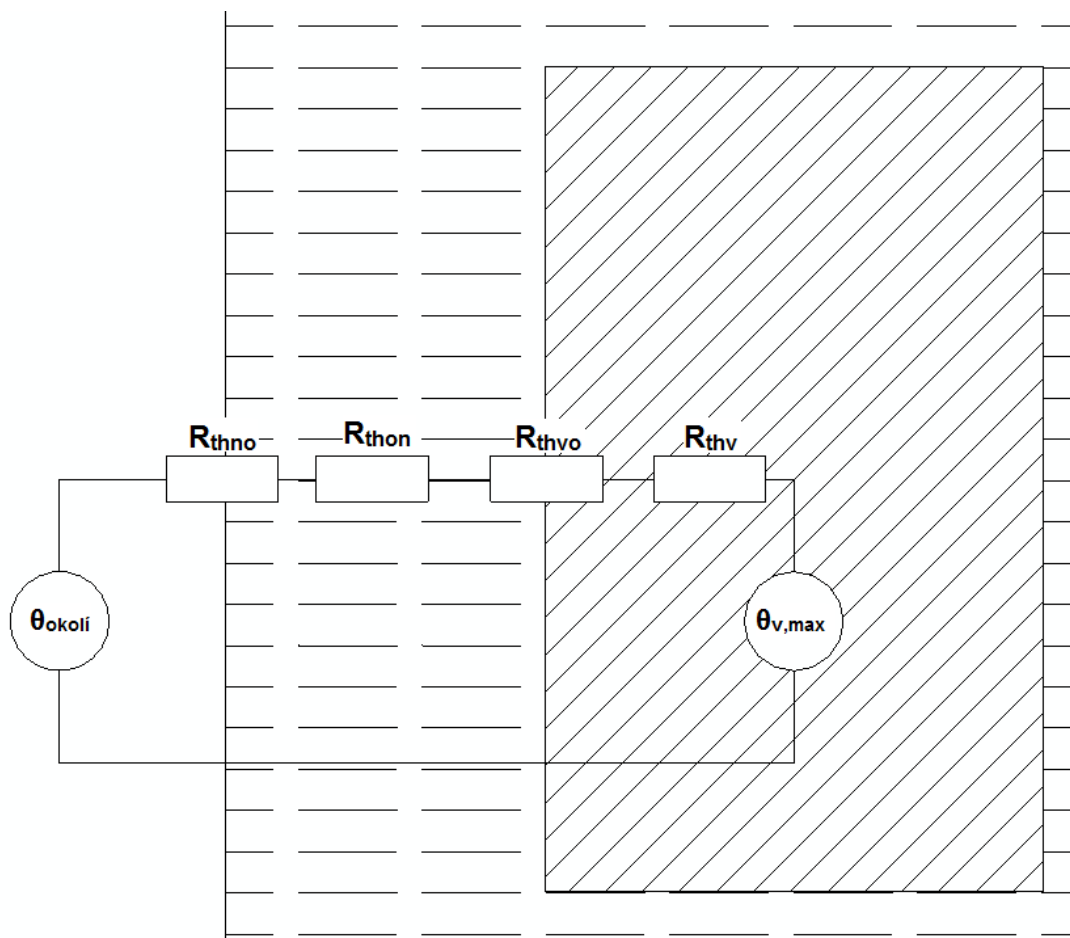
²⁹ Tyto hodnoty se liší pouze o koeficient přídavné hmotnosti z tab. 1.

$$m_{Cu} = n_s \cdot k_{příd} \cdot S_{vin} \cdot \pi \cdot D_{stř} \cdot N \cdot \rho_{Cu} \quad (47)$$

Využitím Jouleova zákona a hmotnosti (objemu) vlastního vinutí vypočítáme ztráty nakrátko jako:

$$\Delta P_k = \frac{J^2}{\sigma_{Cu}} \cdot \frac{m_{Cu}}{\rho_{Cu} \cdot k_{příd}} \quad (48)$$

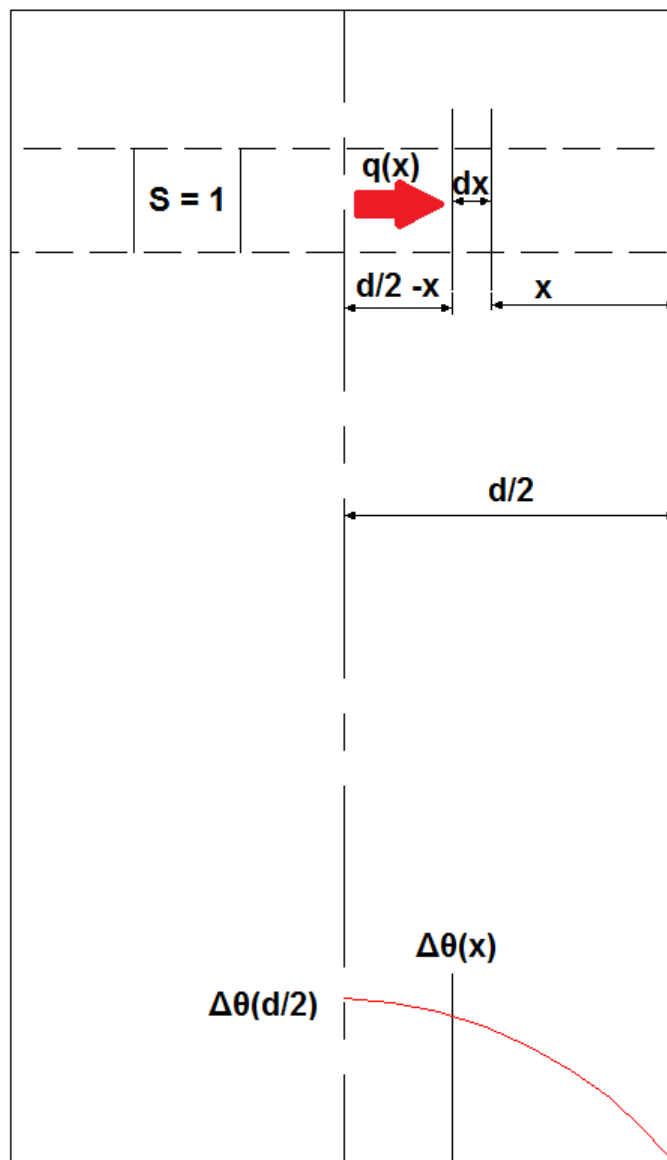
Při výpočtu oteplení jednotlivých částí transformátoru se omezíme pouze na teplo vzniklé ztrátami nakrátko. Ztráty naprázdno jsou totiž o řád menší a navíc ovlivní pouze oteplení oleje, které se stanovuje odhadem. Teplo se tedy bude šířit z celého objemu vinutí a bude postupovat přes olej směrem k nádobě, kde dojde k tepelné výměně s externím chladícím médiem – vzduchem. Každý úsek bude mít určitý tepelný odpor; bude nám zde tedy vznikat teplotní spád. Naším úkolem bude navrhnout transformátor tak, aby tento teplotní spád splňoval normu ČSN EN 60076-2 (podrobnosti viz výše). Celá situace je znázorněna na obrázku 5.



Obr. 5 – Znázornění problematiky oteplení transformátoru pomocí náhradního tepelného obvodu³⁰

³⁰ Vysvětlivky: θ_{okoli} - teplota okolí, $\theta_{v,max}$ - teplota hot spotu vinutí, R_{thv} - tepelný odpor vinutí, R_{thvo} - tepelný odpor rozhraní vinutí - olej, R_{thon} - tepelný odpor rozhraní olej - nádoba, R_{thno} - tepelný odpor rozhraní nádoba - okolí

Stanovme nejprve průběh oteplení uvnitř samotného vinutí. Poznamenejme ovšem, že oteplení uvnitř vinutí budeme řešit pouze v případě sekundárního vinutí – primární vinutí má zanedbatelně malou izolaci a vzhledem k vysoké tepelné vodivosti mědi bude nárůst teploty uprostřed vinutí zanedbatelný. Teplo ve vinutí vzniká jako Jouleovy ztráty na jednotlivých vodičích. Vinutí se ovšem neskládá pouze z tepelných zdrojů (resp. vodičů); je zde i elektrická izolace vodičů, která žádné teplo negeneruje. Vezmeme-li v potaz, že izolační vrstva vodiče je mnohem menší, než vrstva vodivá (měď), můžeme uvažovat vznik tepla v celém objemu vodiče. Vypočtený tepelný tok tak bude o něco vyšší, než je jeho skutečná hodnota. To ovšem znamená, že vypočtená hodnota oteplení bude také o něco vyšší než hodnota skutečná; užitím této hodnoty při porovnání s kritérii na oteplení nikterak nesnížíme bezpečnost stroje či jeho životnost. Obecný průběh oteplení uvnitř vinutí včetně označení používaných veličin je na obrázku 6.



Obr. 6 – Průběh oteplení uvnitř vinutí; pro výpočet budeme pracovat s jednotkovou plochou prostupu tepla, jež je zde vyznačená

Prvním krokem výpočtu oteplení uvnitř vinutí je stanovení tepelného toku. Tepelný tok se mění se vzdáleností od okraje vinutí. Vzhledem k zanedbání izolačních vrstev můžeme říci, že se bude tento tepelný tok zvětšovat lineárně od středu vinutí směrem ven. Pokud je vinutí symetrické a na obou jeho koncích se nacházejí dostatečně široké chladicí kanálky, bude v polovině jeho šířky nejvyšší hodnota oteplení.

Sepíšme tedy funkci pro velikost tepelného toku q uvnitř vinutí. Uprostřed vinutí by měl být tok nulový a postupně se zvětšovat dokud nedosáhne svého maxima na kraji vinutí. Pro zjednodušení budeme uvažovat, že se tepelný tok šíří pomyslným kvádrem, jehož všechny stěny mají jednotkovou plochu. Odpadnou tak komplikace při následném stanovení tepelného odporu a také při integrování elementu oteplení. Tepelný tok q tak bude záviset pouze na vzdálenosti x od okraje vinutí a bude stanoven funkcí:

$$q(x) = \frac{J^2}{\sigma} \left(\frac{d}{2} - x \right) (S = 1) \quad (49)$$

Pro stanovení tepelného odporu využijeme vztah analogický k Ohmově zákonu v integrální podobě. Vztah uvedeme pro element šířky vrstvy dx jako:

$$dR_{\theta} = \frac{dx}{\lambda(S = 1)} = \frac{dx}{\lambda} \quad (50)$$

Pomocí rovnic (49) a (50) již dokážeme určit velikost elementu oteplení v závislosti na vzdálenosti od kraje vinutí. Vzorec bude opět vycházet z analogie k elektrickému obvodu:

$$d\Delta\theta(x) = dR_{\theta} \cdot q(x) = \frac{J^2}{\sigma\lambda} \left(\frac{d}{2} - x \right) dx \quad (51)$$

Integrováním pravé části rovnice (51) získáme funkci popisující oteplení uvnitř vinutí v závislosti na vzdálenosti od kraje. Integrovat tedy budeme přes proměnnou x a tím získáme vztah:

$$\Delta\theta(x) = \frac{J^2}{\sigma\lambda} \int \left(\frac{d}{2} - x \right) dx = \frac{J^2}{\sigma\lambda} \left(\frac{d}{2}x - \frac{1}{2}x^2 \right) + C \quad (52)$$

Funkce má smysl pouze pro hodnoty proměnné x v intervalu $\langle 0, d \rangle$. Mimoto známe hodnotu oteplení pro $x = 0$ a můžeme tak stanovit velikost integrační konstanty C :

$$\Delta\theta(0) = 0 \rightarrow \frac{J^2}{\sigma\lambda} \left(\frac{d}{2} \cdot 0 - \frac{1}{2} \cdot 0^2 \right) + C = 0 \rightarrow C = 0 \quad (53)$$

Nyní postačí najít maximum funkce oteplení uvnitř vinutí. Již jsme uvedli, že se toto maximum bude nacházet v místě $x = d/2$. Dosazením této hodnoty získáme konečný vztah pro maximální hodnotu oteplení:

$$\Delta\theta_m = \Delta\theta \left(\frac{d}{2} \right) = \frac{J^2}{\sigma\lambda} \left(\frac{d}{2} \cdot \frac{d}{2} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right) = \frac{J^2}{\sigma\lambda} \cdot \frac{d^2}{8} \quad (54)$$

V samotném programu bude ještě nutné určit ekvivalentní tepelnou vodivost. Vinutí se totiž kromě vodivé části skládá i z izolace, která má velmi odlišné vlastnosti. Vzhledem k velmi nízké hodnotě tepelné vodivosti izolace oproti mědi ($\lambda_{lak} = 0,15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\lambda_{Cu} = 386 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) můžeme stanovit vodivost pouze z vrstev laku. Ekvivalentní tepelná vodivost bude tedy:

$$\lambda_{ekv} = \lambda_{lak} \frac{d_v + 2d_{lak}}{2d_{lak}} \quad (55)$$

Postupme k výpočtu středního oteplení vinutí nad olejem. K odvodu tepla dochází pouze jedním mechanismem: konvekcí. Olej je totiž neprůzračný, a proto se zde neuplatní odvod tepla sáláním. Použijeme opět vztah pro Jouleovo ztráty, který vynásobíme šířkou polohy. Získáme tím výkon, který bude nutný odvést právě konvekcí. Vztah ještě bude nutné opatřit o související koeficienty uvedené v podkapitole 2.1:

$$P_{konv} = \frac{J^2}{\sigma_{Cu}} * a * k_p * k_{přid} \quad (56)$$

Vyjádřeme rozdíl teplot úpravou rovnice pro výkon odvedený sáláním. V tomto vztahu se vyskytuje součinitel přestupu tepla. Ten zvolíme pro náš případ (minerální transformátorový olej) jako $\alpha = 70 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Plochu, z níž teplo vychází, budeme uvažovat jako jednotkovou. Dodejme ještě, že vinutí bude chlazeno na dvou stranách, a tudíž se ve jmenovateli bude vyskytovat násobek 2. Zároveň bude v některých místech plocha zakryta, a proto opatříme vzorce koeficientem zakrytí ploch:

$$\theta = \frac{P_{konv}}{2 * \alpha * k_{zakr} * (S=1)} \quad (57)$$

Dosazením vztahu (56) do vztahu (57) získáme vyjádření středního oteplení vinutí nad olejem:

$$\theta_{vo} = \frac{J^2 * a}{2 * \sigma_{Cu} * \alpha_{olej}} * \frac{k_p * k_{přid}}{k_{zacr}} \quad (58)$$

Stanovení středního oteplení oleje nad nádobou se v praxi často pouze odhaduje; jeho výpočet je totiž velmi komplexní, a proto se ve většině případů vychází ze zkušeností. Oteplení se pohybuje v rozmezí (5 ÷ 7) K, v našem případě zvolíme horní mez 7 K.

Nyní nám zbývá určit oteplení nádoby vůči okolí. Vezmeme-li maximální hodnoty oteplení stanovené normou ČSN EN 60076-2 a odečteme-li od nich výše vypočtená nebo určená oteplení, stanovíme nejvyšší přípustný rozdíl teplot mezi nádobou a okolím. Víme-li také, že veškeré ztráty transformátoru musejí projít chladicí plochou nádoby, můžeme ze vztahu pro výkon odvedený konvekcí a sáláním stanovit její velikost.

Sálání již v tomto případě nepůjde zanedbat; chladicí plocha bude podstatně větší než u vinutí a rozdíl teplot bude také větší. Vyjádříme tedy vztah pro výkon odvedený sáláním pomocí Stefan-Boltzmannova zákona:

$$P_{sal} = \sigma * \varepsilon * S_{chl} * (T_n^4 - T_{ok}^4) \quad (59)$$

Kde $\sigma = 5.67.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ je Stefan-Boltzmannova konstanta, ε je emisivita povrchu, v našem případě uvažujeme $\varepsilon = 0,5$, S_{chl} je chladicí plocha olejové nádoby a T_n , T_{ok} jsou termodynamické teploty nádoby a okolí, popořadě.

Známe-li teplotu nádoby a okolí a celkový výkon, který je nutný odvést, můžeme úpravou vztahů (58) a (60) vyjádřit velikost chladicí plochy. Součinitel přestupu tepla pro přirozené chlazení vzduchem zvolíme $\alpha = 7 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

$$S_{chl} = \frac{P}{\alpha_{vzd} * \theta_{no} + \sigma * \varepsilon * (T_n^4 - T_{ok}^4)} \quad (60)$$

Teplota okolí je stanovena normou jako 20 °C, pro výpočet jí postačí převést na termodynamickou teplotu, tedy $T_{ok} = 293,15 \text{ K}$.

Stanovení chladicí plochy vzorcem (60) je platné pouze v případě, že stěny nádoby nejsou v podobě vln. Vlny totiž nikterak neovlivňují výkon odvedený sáláním, pouze zvyšují výkon odvedený konvekcí. V případě zvlněného povrch se často pracuje s náhradním součinitelem přestupu tepla, který v sobě zahrnuje i odvod tepla sáláním. Detailní návrh olejové nádoby již ovšem není součástí této práce, proto se omezíme pouze na odhad této chladicí plochy.

Závěrem je ještě nutné stanovit oteplení izolační (chladící) kapaliny v horní vrstvě. Ve vyšších vrstvách bude oteplení oleje kvůli termosifonovému efektu větší než ve vrstvách nižších. Ze zkušeností z praxe vychází konstanta stanovující poměr mezi středním oteplením oleje a jeho maximální hodnotou. Určíme-li tedy střední oteplení oleje jako součet oteplení oleje nad nádobou a oteplení nádoby na okolím a vynásobíme jej touto konstantou, získáme naši hledanou hodnotu.

$$\theta_{o,max} = 1,26 * (\theta_{on} + \theta_{no}) \quad (61)$$

Stanovili jsme tedy vztahy pro výpočet všech požadovaných parametrů transformátoru. Pro variantu samostatného transformátoru s vysokým napětí nakrátko nám tyto výpočty postačí, pro druhou variantu ještě musíme vypočítat parametry tlumivky. To provedeme v následující podkapitole.

2.3 Technické parametry tlumivky

Návrh jednofázové sériové tlumivky (reaktoru) je již z principu jednodušší než návrh transformátoru. Tlumivka má pouze jedno vinutí, které se opět z hlediska úspory materiálu magnetického obvodu dělí na dvě poloviny. Tyto poloviny se pak umísťují na jednotlivé sloupky. V našem případě chceme tlumivku zařadit na stranu nízkého napětí – nevznikají tak náklady spojené s rozměrnou izolací a magnetický obvod může být mnohem menší. Tlumivku umístíme do společné olejové nádoby s transformátorem z ekonomických důvodů. Ve výpočtu chladicí plochy nádoby bude ovšem nutné přičíst ke ztrátám transformátoru i ztráty tlumivky. Konkrétní vstupní parametry jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 – Parametry pro návrh tlumivky

Veličina	Hodnota
Jmenovitý zdánlivý výkon	208,4 kVA
Jmenovité napětí	400 V
Fázový proud	521 A
Počet poloh vinutí	2
Činitel plnění vinutí	0,8
Koeficient přídavných ztrát	1,25
Koeficient přídavné hmotnosti	1,1
Kanál mezi polohami	6 mm
Maximální hodnota středního oteplení vinutí (hot spot vinutí)	60 K (78 K)
Kanál u jádra	10 mm
Kanál mezi fázemi	12 mm
Dolní koncová vzdálenost	20 mm
Horní koncová vzdálenost	20 mm
Ztrátové číslo železa (1,5 T)	1,1 W/kg
Činitel plnění železa	0,97
Poměrná rozptylová reaktance	0,3
Koeficient zakrytí chladicí plochy	0,8
Frekvence napětí	50 Hz

Pro vinutí využijeme opět vodičů obdélníkového průřezu jako v případě nízkonapětového vinutí u transformátoru. Činitel plnění vinutí bude tedy 0,8.

Kanál mezi fázemi bude v tomto případě mnohem užší než u transformátoru díky nízkému napětí obou polovin vinutí. Mezi počátkem jedné poloviny vinutí a koncem druhé poloviny vinutí je nejvyšší efektivní napětí pouze 400 V. Stěžejním parametrem pro šířku tohoto kanálu je tedy nárok na odvod tepla, jež spolehlivě splní 12 mm.

Koncové vzdálenosti mohou být také mnohem menší než u transformátoru díky nízkému napětí na vinutích. Pro takovéto napětí postačí pouze nevodivé objímky umístěné na vrchu a na spodu vinutí pro jeho mechanické upevnění. Budeme tak uvažovat s koncovými vzdálenostmi 20 mm [4].

V praxi se v případě tlumivek často využívá magnetického obvodu čtvercového průřezu. Tlumivka má totiž oproti transformátoru pouze jedno vinutí a dá se tedy mnohem snáze navinout i na čtvercový průřez. Magnetický obvod tudíž nebude „stupňovaný“ jako v případě transformátoru a jeho činitel plnění bude vyšší. Zvolme tedy hodnotu 0,97.

U tlumivek se do magnetického obvodu vřazují vzduchové mezery. Jejich účelem je linearizovat indukčnost tak, aby nezávisela na hodnotě proudu (vlivem sycení magnetického obvodu). Ve vzduchové mezeře se totiž soustředí téměř celá energie magnetického pole v magnetickém obvodu. Tato energie je nezávislá na proudu (sycení) a díky tomu odpadá závislost indukčnosti právě na proudu. Vzduchová mezera ovšem představuje velký magnetický odpor (reluktanci) a ovlivňuje tedy celkovou indukčnost tlumivky. Při výpočtu tedy bude nejprve nutné stanovit potřebnou indukčnost tlumivky a z ní určit součet výšek vzduchových mezer.

Zmínili jsme se o tom, že díky menším rozměrům tlumivky (pouze 1 vinutí) můžeme klást na její návrh nižší požadavky. Výšku vinutí budeme v tomto případě požadovat v intervalu (100 ÷ 700) mm a šířku polohy vinutí v intervalu (5 ÷ 33) mm. Ztráty nakrátko omezíme hodnotou 300 W a ztráty naprázdno hodnotou 200 W. Maximální střední oteplení vinutí nad olejem ponecháme na hodnotě 65 K, oteplení hot spotu vinutí nemusíme vzhledem k holému vodiči a vysoké tepelné vodivosti mědi uvažovat.

Ostatní příslušné parametry a koeficienty jsou stejné jako v případě transformátoru.

2.4 Teoretické vztahy pro výpočet tlumivky

Prvním krokem k vytvoření návrhu tlumivky je výpočet její indukčnosti ze zadaných hodnot napětí, napětí nakrátko, proudu (resp. výkonu) a frekvence. Nejprve stanovme jmenovitou impedanci soustavy:

$$Z_N = \frac{U_N}{I_N} \quad (62)$$

Vynásobíme-li jmenovitou impedanci soustavy napětím nakrátko tlumivky, získáme její impedanci nakrátko:

$$Z_K = u_K \cdot Z_N \quad (63)$$

Při znalosti impedance nakrátko lze dopočítat indukčnost tlumivky L využitím zjednodušeného³¹ vzorce:

$$L = \frac{Z_K}{2\pi f} \quad (64)$$

Ze statické definice³² indukčnosti můžeme pak zpětně určit potřebný počet závitů cívky pro vybudování požadovaného magnetického toku.

$$N = \frac{\sqrt{2} * I_N * L}{S_j * B_{j,max}} \quad (65)$$

Indukčnost tlumivky se v praxi vytváří vzduchovými mezerami v magnetickém obvodu. V našem návrhu tedy bude nutné uvažovat i s návrhem vzduchových mezer. Jejich počet je závislý na reluktanci magnetického obvodu. Tuto reluktanci určíme vyjádřením magnetického toku pomocí Hopkinsonova zákona a následným dosazením do statické definice indukčnosti [6].

$$R_m = \frac{N^2}{L} \quad (66)$$

³¹ Impedance se kromě reaktance skládá také z odporu. Odpor vinutí tlumivky však bývá při vysokých výkonech velmi malý oproti indukčnosti, proto jej můžeme zanedbat. Reaktanční složku danou kapacitou neuvažujeme z obdobného důvodu.

³² $N * \Phi = L * I$

Reluktanci můžeme také určit z velikosti vzduchové mezery. Postačí nám znalost průřezu jádra a výšky vzduchové mezery.

$$R_m = \frac{\Delta}{\mu_0 * S_j} \quad (67)$$

Pro určení celkové výšky vzduchových mezer nám postačí dosadit rovnici (67) do rovnice (66) a vyjádřit požadovanou výšku vinutí.

$$\Delta = \frac{\mu_0 * N^2 * S_j}{L} \quad (68)$$

Rozptylové magnetické pole tlumivky se tvoří především v prostoru vzduchových mezer. Tvoří se však také uvnitř vinutí a v prostoru mezi vinutím a magnetickým obvodem. Ve vinutí bude směrem k magnetickému obvodu magnetická indukce růst lineárně a v prostoru kanálu u jádra bude velikost indukce konstantní. Musíme tedy upravit redukovanou šířku vinutí tak, aby odpovídala popisu průběhu magnetické indukce:

$$s = \frac{1}{3} a + k_j \quad (69)$$

Zbylé parametry se již určí obdobně jako v případě transformátoru.

2.5 Řešení varianty transformátor s vysokou reaktancí

Po dosažení hodnot ze zadání a z tab. 1 do programu pro výpočet parametru bylo nalezeno optimální řešení z hlediska ceny. Cena byla stanovována jako součin hmotnosti vinutí/magnetického obvodu a ceny příslušného materiálu (uvedeny v tab. 3). Vypočtené parametry tohoto řešení se nacházejí v tab. 4. Schéma navrhnutého transformátoru je na obr. 7.

Tab. 3 – Cena použitých materiálů

Materiál	Cena za kilogram
Ocelové plechy pro elektrotechniku ³³ , za studena válcované, tloušťka 35 mm, ztrátové číslo 1,1 W/kg při 1,5 T	2,75 €
Měděný vodič ³⁴ , nn vinutí, typ CTC, různé průřezy, papírová izolace, koeficient plnění 0,8 (měď + cena izolace)	\$6,45 + \$1,70
Měděný vodič ³⁵ , vn vinutí, různé průřezy, lakované, koeficient plnění 0,4 (měď + cena izolace) Kurzy ³⁶ (15. 5. 2015)	157,53 Kč + různé, viz přílohy 1 € = 27,46 Kč; \$1 = 24,47 Kč

Tab. 4 – Parametry navrhnutého transformátoru

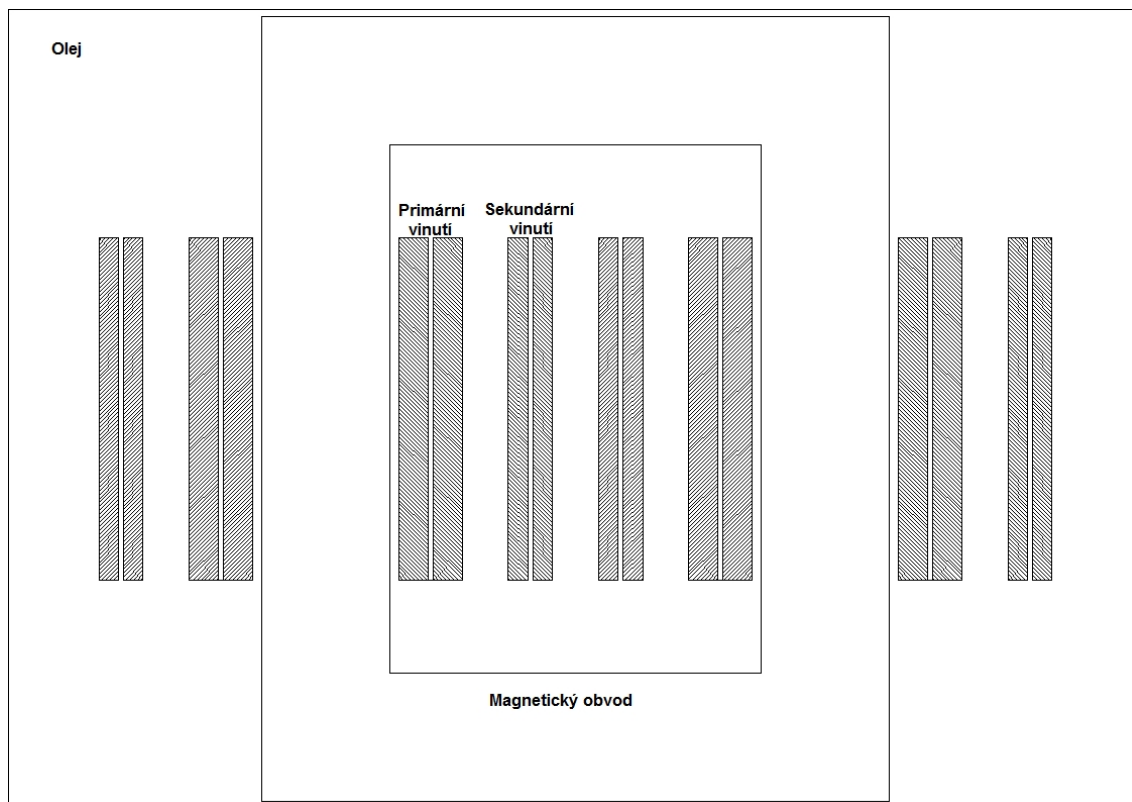
Parametr transformátoru	Hodnota
Průměr jádra	145 mm
Průřez jádra	14 861,7 mm ²
Zvolené sycení pro výpočet	1,6 T
Šířka polohy primáru	33 mm
Šířka polohy sekundáru	22 mm
Počet závitů primáru	76
Počet závitů sekundáru	31 673
Výška vinutí	385,916 mm
Výška okna transformátoru	595,916 mm
Rozteč jader	565,0 mm
Hmotnost magnetického obvodu	296.944 kg
Skutečná hodnota sycení	1,595 T
Ztráty naprázdno	353,783 W
Ztráty nakrátko	4 909,832 W
Průřez vodiče primáru	536,22 mm ²
Průřez vodiče sekundáru	0,429 mm ²
Proudová hustota na primáru	0,972 A/mm ²
Proudová hustota na sekundáru	2,914 A/mm ²
Hmotnost mědi	493,21 kg
Střední oteplení primárního vinutí	53,91 K
Střední oteplení sekundárního vinutí	65,0 K
Oteplení hot spotu sekundárního vinutí	77,88 K
Oteplení oleje v horní vrstvě	59,96 K
Potřebná chladicí plocha	12,349 m ²
Cena mědi pro nn vinutí	59 418,30 Kč
Cena mědi pro vn vinutí	40 056,60 Kč
Cena plechů pro elektrotechniku	22 423,73 Kč
Celkové ztráty varianty	5 263,615 W
Celková cena varianty	121 898,63 Kč

³³ http://www.alibaba.com/product-detail/Electrical-Grain-Oriented-Steel-CRGO_113778396.html

³⁴ http://www.alibaba.com/product-detail/Continuously-Transposed-Conductors-CTC-_203715015.html

³⁵ <http://www.elviko.cz/zbozi/medene-draty/cenik-lak-dratu-sh/>

³⁶ <http://www.kurzy.cz>



Obr. 7 – Schéma navrhnutého transformátoru s vysokou reaktancí v proporcích odpovídajících výpočtu

2.6 Řešení varianty transformátor s nízkou reaktancí a tlumivka

Při výpočtu této varianty opět využijeme stejný program na výpočet vlastností transformátoru, avšak tentokrát zadáme napětí nakrátko pouze 10 %. Vzhledem k nižšímu napětí nakrátko (užší vinutí, nižší hmotnost mědi) si můžeme dovolit snížit maximální ztráty nakrátko; budeme tedy pracovat s hodnotou 4 500 W. Pro výpočet tlumivky využijeme program vycházející z teoretických vztahů odvozených v podkapitole 2.4. Poměrná rozptylová reaktance tlumivky bude v tomto případě 30 % (doplněk do 40 %).

Cena jednotlivých vodičů bude stejná jako v první variantě – budeme tedy opět vycházet z tab. 3.

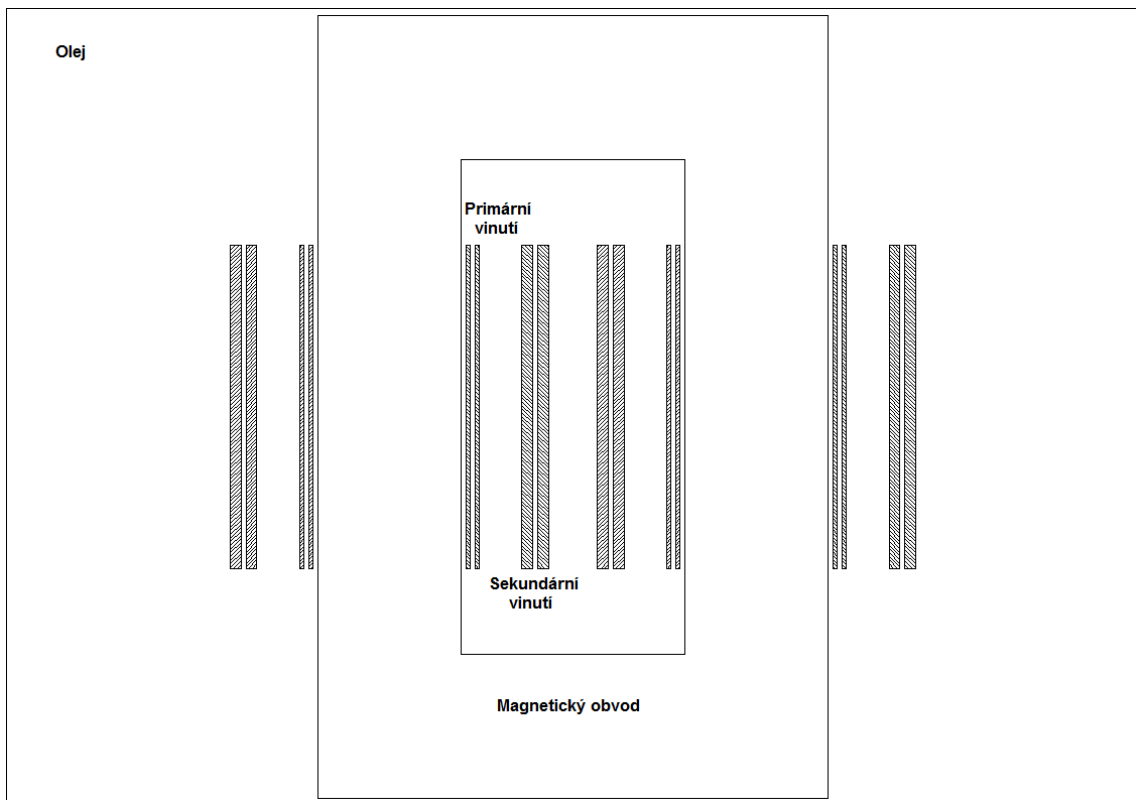
Vypočtené hodnoty pro transformátor jsou uvedeny v tab. 5, hodnoty pro tlumivku a celková cena a ztráty varianty pak v tab. 6. Schéma navrhnutého transformátoru je na obr. 8, tlumivky pak na obr. 9.

Tab. 5 – Parametry navrhnutého transformátoru s nízkým napětím nakrátko

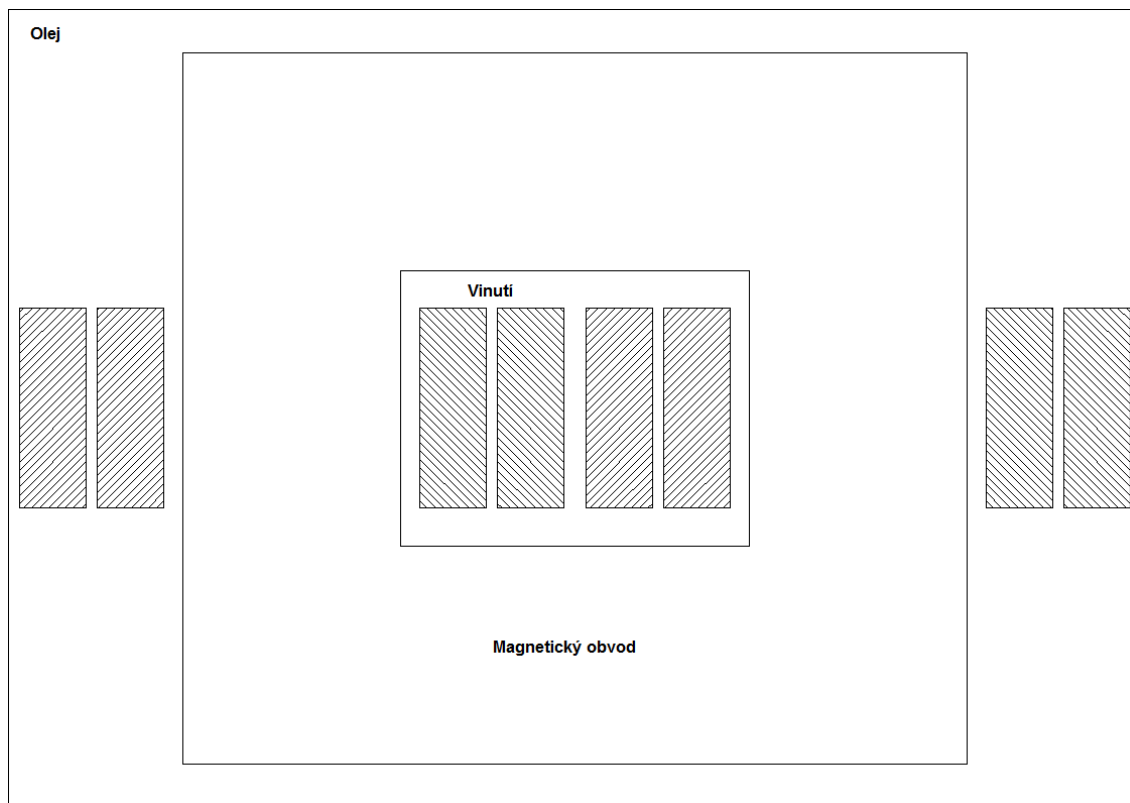
Parametr transformátoru	Hodnota
Průměr jádra	175 mm
Průřez jádra	21 647,54 mm ²
Zvolené sycení pro výpočet	1,65 T
Šířka polohy primáru	5 mm
Šířka polohy sekundáru	13 mm
Počet závitů primáru	51
Počet závitů sekundáru	21 255
Výška vinutí	392,697 mm
Výška okna transformátoru	602,697 mm
Rozteč jader	447,0 mm
Hmotnost magnetického obvodu	405,629 kg
Skutečná hodnota sycení	1,632 T
Ztráty naprázdno	497,897 W
Ztráty nakrátko	4430,114 W
Průřez vodiče primáru	123,199 mm ²
Průřez vodiče sekundáru	0,384 mm ²
Proudová hustota na primáru	4,228 A/mm ²
Proudová hustota na sekundáru	3,255 A/mm ²
Hmotnost mědi	132,491 kg
Střední oteplení primárního vinutí	65,0 K
Střední oteplení primárního vinutí	59,73 K
Oteplení hot spot sekundárního vinutí	65,51 K
Oteplení oleje v horní vrstvě	59,08 K
Potřebná chladicí plocha (s uvažováním ztrát tlumivky)	15,49 m ²
Cena mědi pro nn vinutí	8 155,93 Kč
Cena mědi pro vn vinutí	18 936,46 Kč
Cena plechů pro elektrotechniku	30 631,07 Kč
Celkové ztráty transformátoru	4 928,011 W
Celková cena transformátoru	57 723,46 Kč

Tab. 6 – Parametry navrhnuté tlumivky

Parametr tlumivky	Hodnota
Strana jádra	118 mm
Průřez jádra	13 506,28 mm ²
Indukčnost tlumivky	0,733 mH
Sycení	1,5 T
Šířka polohy vinutí	36 mm
Počet závitů cívky	27
Výška vinutí	108,235 mm
Výška okna transformátoru	148,235 mm
Rozteč jader	306,0 mm
Součet výšky vzduchových mezer	16,874 mm
Hmotnost magnetického obvodu	118,25 kg
Ztráty naprázdno	195,113 W
Ztráty nakrátko	288,736 W
Průřez vodiče vinutí	461,803 mm ²
Proudová hustota vodičů vinutí	1,128 A/mm ²
Hmotnost mědi	83,206 kg
Střední oteplení vinutí nad olejem	8,122 K
Cena mědi pro vinutí	16 568,73 Kč
Cena plechů pro elektrotechniku	8 929,65 Kč
Celkové ztráty tlumivky	483,849 W
Celkové ztráty varianty	5 411,86 W
Celková cena tlumivky	25 498,38 Kč
Celková cena varianty	83 221,84 Kč



Obr. 8 – Schéma navrhnutého transformátoru s nízkou reaktancí v proporcích odpovídajících výpočtu



Obr. 9 – Schéma navrhnuté tlumivky v proporcích odpovídajících výpočtu

3 Porovnání variant z hlediska ekonomické efektivity

V předchozích kapitolách jsme navrhli oba transformátory a tlumivku a podařilo se nám určit jejich ztráty a cenu použitých materiálů. Zbývá nám určit, která z variant bude lepší z ekonomického hlediska, a tedy pro kterou variantu bychom se při koupi rozhodli. O variantách budeme uvažovat jako o investicích z projektového hlediska a pro jejich porovnání použijeme ekonomické kritérium čisté současné hodnoty³⁷.

Čistou současnou hodnotu definujeme jako součet diskontovaných peněžních toků (DCF) v jednotlivých letech trvání projektu a vynaložené počáteční investice. Peněžní tok v jednotlivých letech odpovídá rozdílu příjmů a výdajů plynoucích z projektu. Diskontem se rozumí uvažování ceny ušlé příležitosti – peníze jsme schopni investovat jinak s určitým zhodnocením. Výše diskontu zásadně ovlivňuje velikost čisté současné hodnoty investice, a tudíž i naše následné rozhodování. Matematicky je pak čistá současná hodnota definována jako:

$$NPV = \sum_{t=0}^{t=T_z} \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (70)$$

Abychom mohli určit čistou současnou hodnotu obou variant projektu, musíme nejprve znát dobu životnosti obou investic, stanovit diskont a spočítat peněžní toky.

Doba životnosti celé soustavy zdroje pro odlučovač (tj. transformátor, (tlumivka), diodový můstek) se v praxi uvažuje jako 25 let. Pro náš výpočet tedy použijeme stejnou hodnotu.

Při stanovování diskontu využijeme údajů České národní banky pro úrok při půjčce do 7,5 milionu Kč nefinančnímu podniku na dobu delší než 5 let. Úroková míra totiž představuje diskont zvolený bankou pro investici – půjčení peněz, a proto můžeme brát tuto hodnotu jako kvalifikovaný odhad našeho diskontu. Použijeme tedy hodnotu odpovídající úroku pro březen 2015: 3,59 % [7].

Takto stanovená hodnota bude odpovídat nominálnímu diskontu. Jelikož nás ale při rozhodování o projektu bude zajímat jeho reálná hodnota, bude vhodné převést nominální diskont na reálný diskont, neboli uvažovat se změnou kupní síly peněz. Kupní síla peněz ve většině případů klesá a její změnu charakterizuje míra inflace. Pro náš výpočet stanovíme míru inflace 2 %, jež odpovídá dlouhodobému cíli České národní banky. Reálný diskont pak bude určen vztahem:

³⁷ Anglicky Net Present Value (NPV)

$$r_r = \frac{r_n - \alpha}{1 + \alpha} \quad (71)$$

Dosadíme-li potřebné hodnoty do vzorce (71), získáme reálný diskont 1,56 %.

Přejdeme ke stanovení finančních toků v jednotlivých letech. Pořizovací náklady odpovídají peněžnímu toku v „nultém“ roce, neboli v momentu rozhodování. Postačí nám tedy vzít cenu jednotlivých variant jako výdaj v tomto momentu. V dalších letech nás budou zajímat výdaje spojené se ztrátami zdroje. Odlučovač bude napájen přímo ze sítě vlastní spotřeby elektrárny, a tudíž budeme výdaje na ztráty stanovovat jako cenu ušlé příležitosti prodeje elektřiny provozovateli přenosové sítě. Cenu 1 kWh elektrické energie převezměme ze světového trhu – dne 15. 5. 2015 byla tato cena 0,86 Kč [8].

Pro výpočet ročních výdajů je ještě nutné určit celkovou dobu provozu odlučovače. Odlučovač musí být napájen po celou dobu provozu jakéhokoliv kotle uvnitř uhelné elektrárny. Jinými slovy, pokud elektrárna vyrábí elektrickou energii, odlučovač musí být v provozu. Poměrné využití uhelné elektrárny stanovuje faktor dostupnosti (volný překlad z anglického availability factor), pro uhelné elektrárny se pohybuje jeho hodnota v rozmezí (70 ÷ 90) %, pro náš případ zvolíme hodnotu 80 % [9].

Roční výdaje pak budou dány součinem faktoru dostupnosti, počtu hodin v roce, ceny 1 kWh elektrické energie a ztrát v kW.

Z předchozích odstavců je patrné, že obě varianty – investice budou prodělečné. To je zapříčiněno nutností pořízení odlučovače popítku. Stále však půjdou investice porovnat z hlediska čisté současné hodnoty; větší NPV stále bude znamenat lepší variantu, i když bude jeho hodnota záporná. Pokud bychom se o investici rozhodovali z hlediska podniku, mohli bychom využít výdaje za elektrickou energii (v tomto případě i náklady) ke tvorbě daňového štítu. Dalo by se také spekulovat o úspoře za nákup emisních povolenek, ovšem bylo by nutné podrobně stanovit efektivitu odlučovače a průtokový objem kouře, a z toho určit hmotnost skleníkových plynů. V této práci budeme porovnávat investice pouze z hlediska projektu.

Známe tedy již veškeré předpoklady pro výpočet čisté současné hodnoty obou variant projektu. V Tab. 7 a Tab. 8 jsou uvedeny peněžní toky v jednotlivých letech pro obě varianty. V druhém sloupci se nacházejí peněžní toky bez uvažování diskontu. Jsou určeny jako výdaje spojené se ztrátami zdroje pro odlučovač. Ve třetím sloupci jsou uvedeny již diskontované peněžní toky a ve čtvrtém sloupci je kumulovaný diskontovaný peněžní tok za uplynulá období. Kumulovaný diskontovaný peněžní tok v posledním období trvání projektu vlastně odpovídá pravé straně rovnice (70) a představuje proto čistou současnou hodnotu investice³⁸.

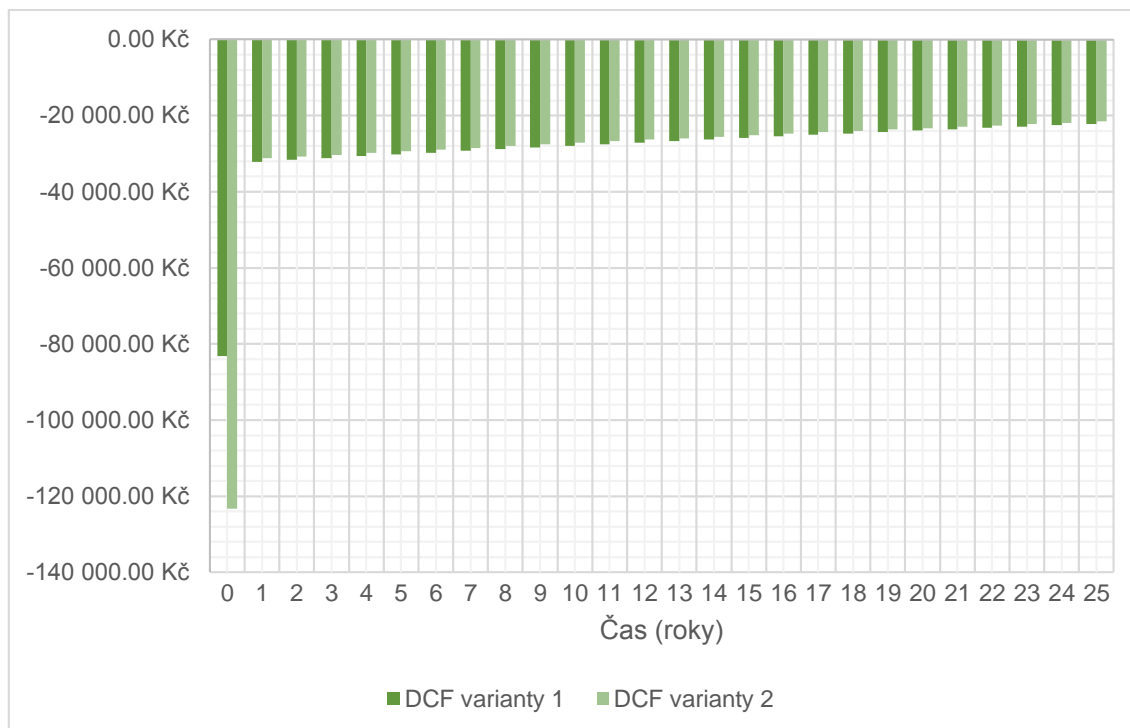
³⁸ CF – peněžní tok, DCF – diskontovaný peněžní tok, KDCF – kumulovaný diskontovaný peněžní tok.

Tab. 7 – Peněžní toky v jednotlivých letech pro variantu transformátor + tlumivka

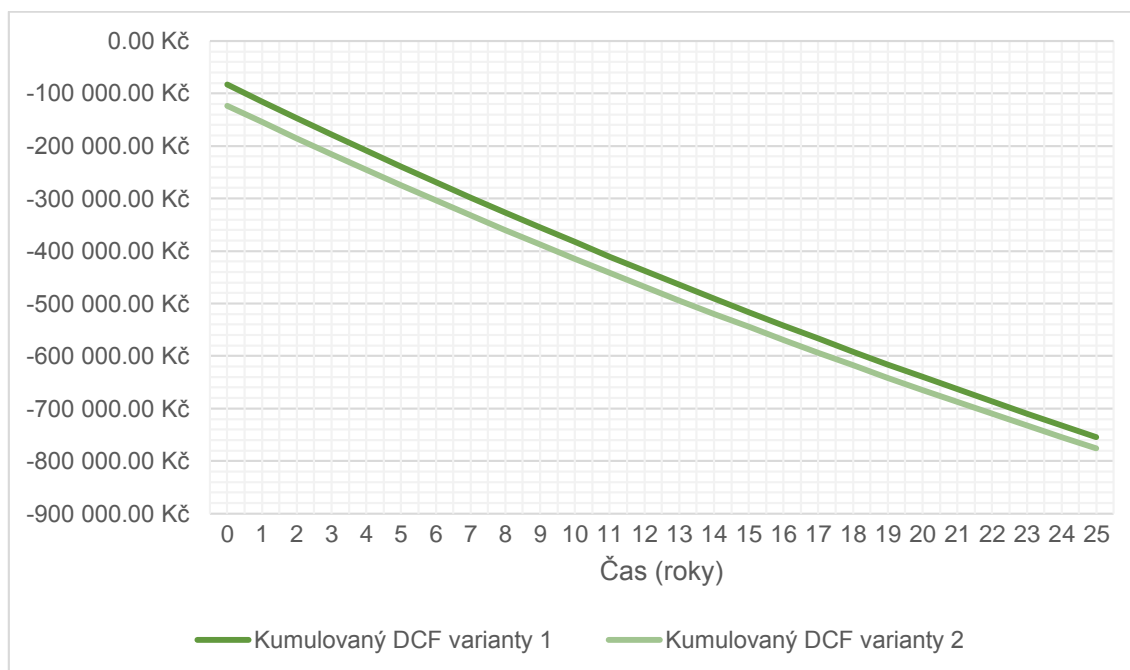
Období	CF	DCF	KDCF
0	-83 221.84 Kč	-83 221.84 Kč	-83 221.84 Kč
1	-32 616.63 Kč	-32 116.00 Kč	-115 337.84 Kč
2	-32 616.63 Kč	-31 623.05 Kč	-146 960.89 Kč
3	-32 616.63 Kč	-31 137.67 Kč	-178 098.56 Kč
4	-32 616.63 Kč	-30 659.74 Kč	-208 758.30 Kč
5	-32 616.63 Kč	-30 189.14 Kč	-238 947.44 Kč
6	-32 616.63 Kč	-29 725.77 Kč	-268 673.21 Kč
7	-32 616.63 Kč	-29 269.51 Kč	-297 942.73 Kč
8	-32 616.63 Kč	-28 820.25 Kč	-326 762.98 Kč
9	-32 616.63 Kč	-28 377.89 Kč	-355 140.87 Kč
10	-32 616.63 Kč	-27 942.32 Kč	-383 083.19 Kč
11	-32 616.63 Kč	-27 513.44 Kč	-410 596.63 Kč
12	-32 616.63 Kč	-27 091.13 Kč	-437 687.76 Kč
13	-32 616.63 Kč	-26 675.31 Kč	-464 363.07 Kč
14	-32 616.63 Kč	-26 265.87 Kč	-490 628.95 Kč
15	-32 616.63 Kč	-25 862.72 Kč	-516 491.67 Kč
16	-32 616.63 Kč	-25 465.75 Kč	-541 957.42 Kč
17	-32 616.63 Kč	-25 074.88 Kč	-567 032.30 Kč
18	-32 616.63 Kč	-24 690.01 Kč	-591 722.30 Kč
19	-32 616.63 Kč	-24 311.04 Kč	-616 033.34 Kč
20	-32 616.63 Kč	-23 937.89 Kč	-639 971.23 Kč
21	-32 616.63 Kč	-23 570.47 Kč	-663 541.70 Kč
22	-32 616.63 Kč	-23 208.69 Kč	-686 750.39 Kč
23	-32 616.63 Kč	-22 852.46 Kč	-709 602.84 Kč
24	-32 616.63 Kč	-22 501.69 Kč	-732 104.54 Kč
25	-32 616.63 Kč	-22 156.32 Kč	-754 260.86 Kč
NPV = -754 260.86 Kč			

Tab. 8 – Peněžní toky v jednotlivých letech pro variantu samostatný transformátor

Období	CF	DCF	KDCF
0	-123 262.96 Kč	-123 262.96 Kč	-123 262.96 Kč
1	-31 723.18 Kč	-31 236.26 Kč	-154 499.22 Kč
2	-31 723.18 Kč	-30 756.81 Kč	-185 256.03 Kč
3	-31 723.18 Kč	-30 284.73 Kč	-215 540.76 Kč
4	-31 723.18 Kč	-29 819.89 Kč	-245 360.65 Kč
5	-31 723.18 Kč	-29 362.18 Kč	-274 722.83 Kč
6	-31 723.18 Kč	-28 911.50 Kč	-303 634.34 Kč
7	-31 723.18 Kč	-28 467.74 Kč	-332 102.08 Kč
8	-31 723.18 Kč	-28 030.79 Kč	-360 132.87 Kč
9	-31 723.18 Kč	-27 600.55 Kč	-387 733.42 Kč
10	-31 723.18 Kč	-27 176.91 Kč	-414 910.33 Kč
11	-31 723.18 Kč	-26 759.77 Kč	-441 670.10 Kč
12	-31 723.18 Kč	-26 349.04 Kč	-468 019.13 Kč
13	-31 723.18 Kč	-25 944.61 Kč	-493 963.74 Kč
14	-31 723.18 Kč	-25 546.38 Kč	-519 510.12 Kč
15	-31 723.18 Kč	-25 154.27 Kč	-544 664.39 Kč
16	-31 723.18 Kč	-24 768.18 Kč	-569 432.57 Kč
17	-31 723.18 Kč	-24 388.01 Kč	-593 820.58 Kč
18	-31 723.18 Kč	-24 013.68 Kč	-617 834.27 Kč
19	-31 723.18 Kč	-23 645.10 Kč	-641 479.36 Kč
20	-31 723.18 Kč	-23 282.17 Kč	-664 761.53 Kč
21	-31 723.18 Kč	-22 924.81 Kč	-687 686.34 Kč
22	-31 723.18 Kč	-22 572.94 Kč	-710 259.28 Kč
23	-31 723.18 Kč	-22 226.47 Kč	-732 485.75 Kč
24	-31 723.18 Kč	-21 885.31 Kč	-754 371.06 Kč
25	-31 723.18 Kč	-21 549.40 Kč	-775 920.46 Kč
NPV = -775 920.46 Kč			



Obr. 10 – Diskontované peněžní toky pro obě varianty projektu v době jejich života



Obr. 11 – Průběh kumulovaných diskontovaných peněžních toků obou variant projektu v době jejich života

Z hlediska čisté současné hodnoty se tedy jeví lépe investice transformátor + tlumička; její NPV je vyšší o 21 659,61 Kč než u druhé investice.

Toto porovnání jsme provedli s uvažováním konstantní ceny elektrické energie v celé době trvání projektu. Vzhledem k tomu, že má varianta transformátor s vysokou reaktancí

nižší ztráty, bude při zvyšování ceny za elektrickou energii existovat určitá hodnota růstu, při které budou čisté současné hodnoty obou projektu stejné. Provedeme tedy citlivostní analýzu; budeme měnit hodnotu růstu ceny za elektrickou energii za současného určování rozdílu NPV jednotlivých projektů.

Pro naše dvě investice vychází pro nulový rozdíl NPV průměrný roční růst ceny elektrické energie 5,86 % po celou dobu trvání (25 let). Vzhledem k současným tendencím změny ceny elektrické energie je tato hodnota nereálná, a proto bychom se rozhodli k realizaci vari

Závěr

Cílem této bakalářské práce byl návrh a porovnání dvou různých variant napájení elektrostatického odlučovače popílků. Návrh se sestával z výpočtu rozměrů transformátoru (a tlumivky) s ohledem na předem daná tepelná, rozměrová a ztrátová kritéria. Z určených parametrů byla stanovena cena nejpodstatnějších částí těchto elektrických zařízení – vinutí a magnetického obvodu. Ze všech návrhů, které splnily zadaná kritéria, bylo vybráno nejlevnější řešení. Na konci práce se porovnála nejlevnější řešení obou variant na základě ekonomického ukazatele čisté současné hodnoty.

V případě varianty transformátor s napětím nakrátko 10 % + tlumivka byla určena cena jako **83 221,84 Kč**. Ztráty soustavy činily **5 411,86 W** a čistá současná hodnota této investice byla stanovena jako **-754 260.86 Kč** při reálném diskontu 1,56 % a době životnosti 25 let.

Cena varianty transformátor s napětím nakrátko 40 % byla stanovena jako **123 262.96 Kč**. Ztráty této soustavy činily **5 263,615 W** a čistá současná hodnota investice byla určena jako **-775 920.46 Kč** při stejném diskontu a době životnosti jako v první variantě.

Na základě nižší čisté současné hodnoty byla zvolena varianta transformátor s napětím nakrátko 10% + tlumivka. Tento výběr odpovídal reálné praxi, kde se jako zdroje pro odlučovače používají soustavy transformátor – tlumivka.

V posledním bodě ekonomického zhodnocení byla stanovena hodnota růstu ceny elektrické energie, při které by byly obě varianty rovnocenné z hlediska čisté současné hodnoty. Tato hodnota odpovídala **5,86 %** a byla shledána jako nereálná. Definitivně se tedy rozhodlo, že varianta transformátor s napětím nakrátko 10 % + tlumivka je z investičního hlediska lepší.

Reference

- [1] An Overview of Electrostatic Precipitators. [online]. [cit. 2014-12-15]. Dostupné z: <http://www.precip.com/environmental-construction-services/electrostatic-precipitators>
- [2] OHIO ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Electrostatic Precapitators* [online]. [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.epa.state.oh.us/portals/27/engineer/eguides/electro.pdf>
- [3] Electrostatic Precipitators. [online]. [cit. 2014-12-15]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatic_precipitator
- [4] KARSAI, K., D. KERÉNYI a L. KISS. *Large Power Transformers*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 1987. ISBN 963 05 4112 2.
- [5] JAROŠEK, Jozef a Rudolf PLENCNER. *Transformátory*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1961.
- [6] PANKRÁC, Vítězslav. *Pomocné texty k přednáškám z teorie elektromagnetického pole* [online]. 2013 [cit. 2014-12-06]. Dostupné z: http://www.elmag.org/sites/default/files/users/pankrac/files/text_A1B17EMP.pdf
- [7] 2015. Tabulka B1.3: Úrokové sazby korunových úvěrů poskytnutých bankami nefinančním podnikům v ČR - nové obchody (%). *ARAD - Systém časových řad - Česká národní banka* [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://www.cnb.cz/cnb/STAT.ARADY_PKG.VYSTUP?p_period=1
- [8] Elektřina - aktuální a historické ceny elektřiny, graf vývoje ceny elektřiny - 1 rok - měna CZK 1 kWh. *Kurzy měn, akcie, komodity, zákony, zaměstnání - Kurzy.cz* [online]. 2015 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://www.kurzy.cz/komodity/cena-elektriny-graf-vyvoje-ceny/index.asp?A=5&idk=142&curr=CZK&on=0&unit=1%20kWh&lg=1>
- [9] Availability factor. *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. 2006 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Availability_factor

Přílohy

Graf A1 – Průběh elektrického pole uvnitř hlavního kanálu³⁹

Graf A2 – Doporučená koncová vzdálenost vinutí⁴⁰

Graf A3 – Cena izolace mědi pro VN vinutí⁴¹

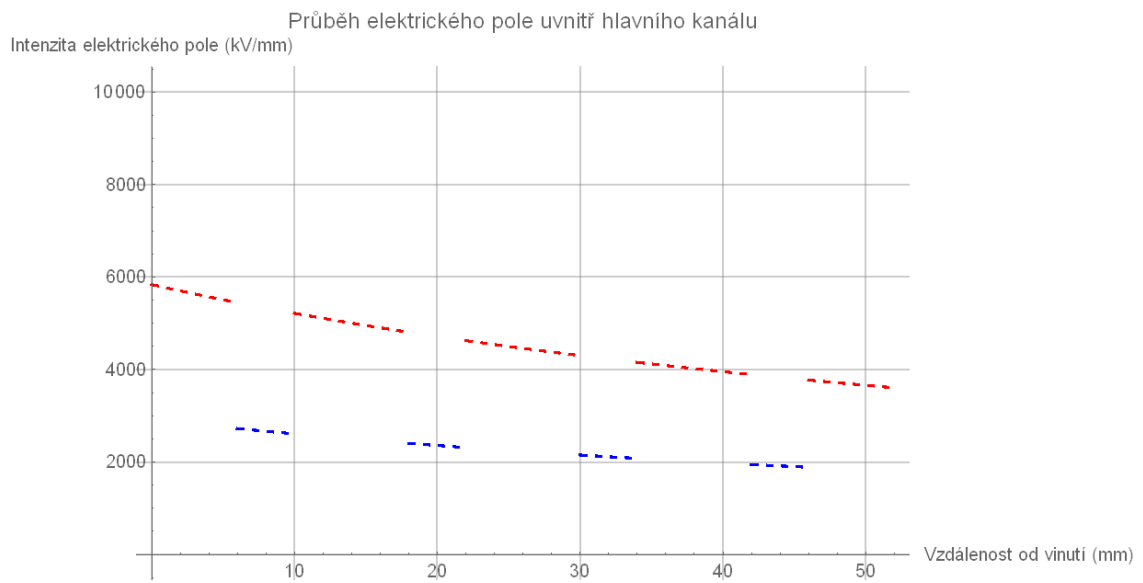
Tabulka A4 – Seznam použitých značek při výpočtech

³⁹ Červený průběh značí intenzitu elektrického pole v olejových vrstvách, modrý v elektrotechnické lepence

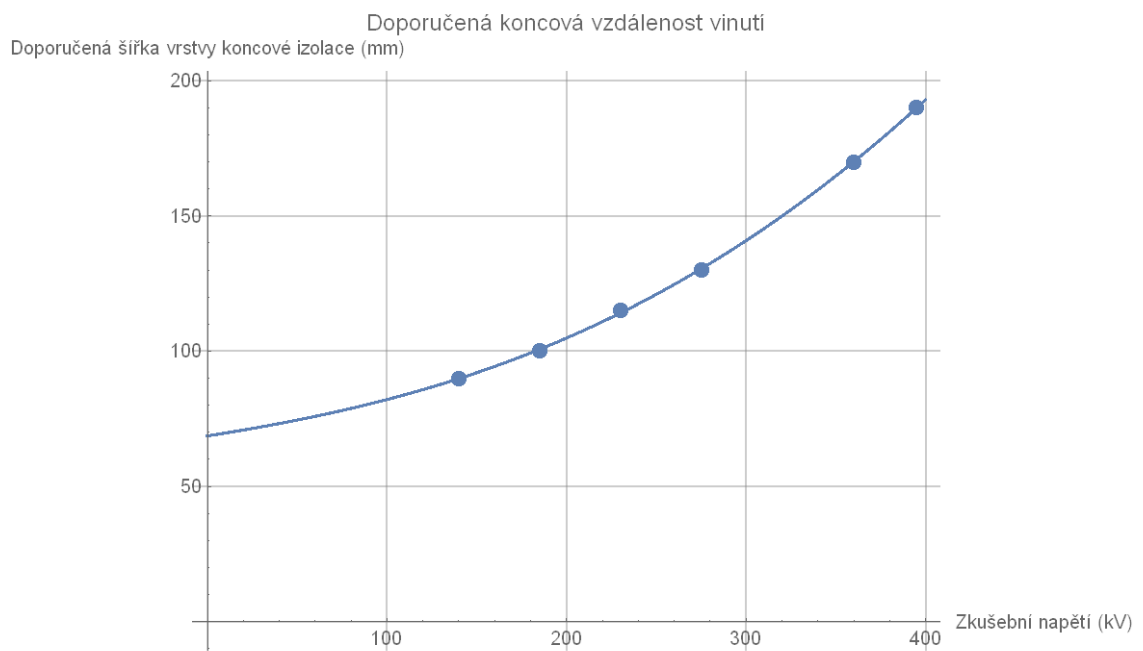
⁴⁰ Podle [4], hodnoty převzaté z tabulky jsou proloženy polynomem 5. stupně

⁴¹ Z nabídky dodavatele, hodnoty proloženy hyperbolou; <http://www.elviko.cz/zbozi/medene-draty/cenik-lak-dratu-sh/>

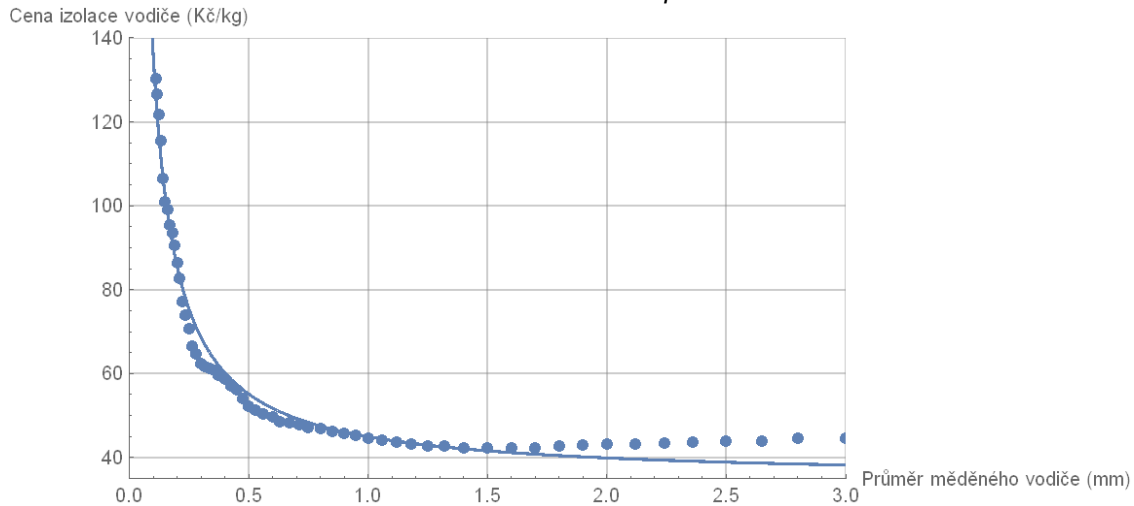
Graf A1 – Průběh elektrického pole uvnitř hlavního kanálu



Graf A2 – Doporučená koncová vzdálenost vinutí



Graf A3 – Cena izolace mědi pro VN vinutí



Tabulka A4 - Seznam použitých značek při výpočtech

Značka	Definice
x_{σ}	Poměrná rozptylová reaktance
B_j, B_{\max}	Sycení jádra
u_i	Indukované napětí
N, N_k	Počet závitů cívky, vinutí
Φ, Φ_m	Magnetický tok, amplituda magnetického toku
ω	Úhlová rychlost harmonické veličiny
t	Čas
S_j	Průřez jádra
u_K, u_R, u_L	Napětí nakrátko a jeho příslušné složky
R_K	Odpor vinutí
U_n, I_n, P_n, Z_n	Jmenovitý proud, napětí, výkon a impedance
$\Delta P, \Delta P_K$	Ztráty, ztráty nakrátko
X, X_K	Reaktance vinutí, reaktance vinutí při zapojení transformátoru nakrátko
a, a_x, a_r	Šířka vinutí, redukovaná šířka vinutí
Δ	Šířka kanálku mezi vinutími
δ	Šířka hlavního kanálu
L, L_{σ}, L_K	Indukčnost vinutí, rozptylová indukčnost, indukčnost vinutí při zapojení transformátoru nakrátko
A_{σ}	Energie rozptylového magnetického pole
I_K	Proud nakrátko
μ, μ_0	Permeabilita, permeabilita vakua
l_s, l_c	Délka magnetické siločáry, délka cívky
H	Intenzita magnetického pole
V_{σ}	Objem rozptylového magnetického pole
$B_{stř}$	Střední hodnota magnetické indukce
D_{str}	Střední průměr vinutí
f	Frekvence harmonické veličiny
u_N	Napětí na závit cívky
s	Redukovaná šířka vinutí
K_R	Redukční činitel výšky cívky
h_o	Výška okna transformátoru
$k_{k,d}, k_{k,h}$	Dolní a horní koncová vzdálenost
R_j	Rozteč jader
k_j, k_f	Kanál u jádra, kanál mezi fázemi
m_{Fe}, m_{Cu}	Hmotnost magnetického obvodu, vinutí
ρ_{Fe}, ρ_{Cu}	Hustota železa, mědi
ΔP_0	Ztráty naprázdno
$\rho_{z,0}$	Ztrátové číslo ve směru válcování plechu
S_{vin}	Průřez vinutí
k_p	Koeficient plnění vinutí

J	Proudová hustota
$k_{\text{přid}}$	Koeficient přidavných ztrát ve vinutí
S_{chl}	Chladicí plocha olejové nádoby
n_{pol}	Počet poloh vinutí
k_{zak}	Koeficient zakrytí chladicí plochy
α	Součinitel prostupu tepla
Z_k	Zkratová impedance
R_m	Magnetická reluktance
Δ	Počet vzduchových mezer (v případě tlumivky)
s_j	Délka strany magnetického jádra
r_n, r_r	Nominální, reálný diskont
NPV	Čistá současná hodnota
$CF, DCF, KDCF$	Peněžní tok (Cash Flow); diskontovaný, kumulovaný diskontovaný