



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ VÝROBY VINUTÍ VYSOKÉHO NAPĚTÍ SUCHÝCH TRANSFORMÁTORŮ.

PRODUCTION COMPARISON OF HIGH VOLTAGE WINDING OF DRY TRANSFORMERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Miroslav Mrajca

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Miroslav Mrajca

ID: 195393

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Porovnání technologií výroby vinutí vysokého napětí suchých transformátorů.

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provedte literární rešerši dané problematiky
2. Popište postup výroby a technologii suchých výkonových transformátorů
3. Provedte návrh vybraného typu transformátoru
4. Porovnejte na základě návrhu různé technologie výroby vinutí vysokého napětí transformátorů výkonového a napěťového rozsahu (400, 1000, 1600) kVA, 22/0,4 kV.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PETROV, Georgij N. Elektrické stroje 1: Úvod - Transformátory. 1. Praha: Academia nakladatelství Československé akademie věd, 1980. ISBN 21-045-80.
- [2] BAŠTA, Jan, Imrich MAYER a Jaroslav CHLÁDEK. Teorie elektrických strojů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1968. Řada elektrotechnické literatury.
- [3] STUČHL, Pavel. Návrh jednoduchých vzduchových transformátorů. Firemní literatura fy. Elpro –Energ, s.r.o. 2018.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 22.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá historií, významem, použitím, konstrukčním provedením a principem funkce transformátorů. Práce se dále zaměřuje na podrobný popis částí, ze kterých se skládá suchý výkonový transformátor, a také na popis jejich výroby a následné montáže do jednoho celku. Součástí práce je postup návrhu suchého transformátoru s příkladem výpočtu. Výstupem práce je porovnání různých technologií vinutí vyššího napětí z hlediska nákladů na výrobu a činitele plnění vinutí.

Klíčová slova

Suchý transformátor, výroba, jádro, vinutí, montáž, návrh, výpočet, porovnání

Abstract

This bachelor thesis deals with the history, importance, usage, construction and principle of the operation of transformers. The thesis also focuses on the detailed description of the parts which the dry power transformer is composed from, as well as the description of their manufactory and following assembly into one unit. The thesis contains the comparison of different technologies of manufactory of higher voltage winding and magnetic circuit. The thesis contains a process of design of the dry transformer with an example of calculation. The output is a comparison of different high voltage winding technologies in terms of production costs and winding factor.

Keywords

Dry transformer, manufactory, core, winding, montage, design, calculation, comparison

Bibliografická citace:

MRAJCA, Miroslav. *Porovnání technologií výroby vinutí vysokého napětí suchých transformátorů*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119651>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Čestmír Ondrůšek.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Porovnání technologií výroby vinutí vysokého napětí suchých transformátorů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: **4. května 2019**

.....
Miroslav Mrajca, podpis

Poděkování

„Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu doc. Ing. Čestmíru Ondříškovi, CSc. za cenné rady, trpělivost a za účinnou pedagogickou a odbornou pomoc při realizaci práce, dále bych rád poděkoval externímu zadavateli práce panu Ing. René Mrajcovi za odborné vedení, cenné informace, konzultace a podnětné návrhy k práci. Rovněž bych rád poděkoval panu Ing. Pavlu Stuchlovi za předané vědomosti, obrovskou trpělivost a vstřícnost. Dále děkuji odborným konzultantům pánům Janu Czernekovi, Ing. Janu Šlosárkovi a Ing. Ondřeji Walicovi za pomoc a drahocenné rady při psaní dílčích částí práce.“

V Brně dne: **4. května 2019**

.....
Miroslav Mrajca, podpis

Obsah

1.	Úvod.....	12
2.	Teorie transformátorů.....	13
2.1.	Historie.....	13
2.2.	Význam a použití transformátorů.....	14
2.3.	Konstrukční provedení transformátorů	14
2.4.	Princip činnosti transformátoru.....	16
2.4.1	Ideální transformátor.....	16
2.4.2	Skutečný transformátor a jeho náhradní schéma	19
3.	Výroba Výkonových suchých transformátorů	22
3.1.	Jádro	23
3.1.1	Step-Lap.....	24
3.1.2	Duocore.....	26
3.2.	Vinutí nižšího napětí	27
3.3.	Vinutí vyššího napětí.....	28
3.3.1	Vinutí z vrstvových (polohových) cívek	30
3.3.2	Vinutí složené z fóliových cívek	31
3.3.3	Dvouskupinové vrstvené vinutí	31
3.3.4	Sypané vinutí	32
3.3.5	Diagonální vinutí	33
3.3.6	Dvojedskové (plynulé) vinutí	33
3.3.7	Jednodeskové vinutí.....	34
3.4.	Montáž.....	34
4.	Návrh suchého výkonového transformátoru	36
4.1.	Výpočet jmenovitých fázových napětí a proudů v přípojnicích a ve vinutích. 38	
4.2.	Volba parametrů průřezu magnetického obvodu	39
4.3.	Výpočet průřezu magnetického obvodu.....	39
4.4.	Návrh hodnoty magnetické indukce v jádře.....	40
4.5.	Výpočet počtu závitů.....	40
4.6.	Volba základních parametrů, rozměrů a průřezů vinutí.....	41
4.6.1	Vinutí 1 (NN).....	41
4.6.2	Vinutí 2 (VN).....	42

4.6.2.1	Plynulé vinutí.....	43
4.6.2.2	Sypané vinutí	46
4.6.2.3	Deskové vinutí.....	48
4.7.	Určení elektrických a mechanických průměrů vinutí	50
4.8.	Stanovení axiálních vzdáleností v okně magnetického obvodu.....	52
4.9.	Výpočet odporů vinutí.....	52
4.10.	Výpočet ztrát nakrátko P_{kn}	53
4.11.	Poměrné napětí nakrátko u_k	54
4.12.	Výpočet ztrát naprázdno P_{on}	56
4.13.	Výpočet oteplení transformátoru	57
4.13.1	Oteplení ze ztrát naprázdno	58
4.13.2	Oteplení ze ztrát nakrátko pro vnitřní vinutí 1	58
4.13.3	Oteplení ze ztrát nakrátko pro vnější vinutí 2.....	60
5.	Příklad výpočtu	61
5.1.	Výpočet jmenovitých fázových napětí a proudů v přípojnicích a ve vinutích.	61
5.2.	Volba parametrů průřezu magnetického obvodu	62
5.3.	Výpočet průřezu magnetického obvodu.....	62
5.4.	Návrh hodnoty magnetické indukce v jádře.....	62
5.5.	Výpočet počtu závitů.....	63
5.6.	Volba základních parametrů, rozměrů a průřezů vinutí.....	63
5.6.1	Vinutí 1 (NN).....	63
5.6.2	Vinutí 2 (VN).....	64
5.7.	Určení elektrických a mechanických průměrů vinutí a axiálních vzdáleností v okně magnetického obvodu	65
5.8.	Výpočet odporů vinutí.....	66
5.9.	Výpočet ztrát nakrátko P_{kn}	67
5.10.	Poměrné napětí nakrátko u_k	68
5.11.	Výpočet ztrát naprázdno P_{on}	69
5.12.	Výpočet oteplení transformátoru	70
5.12.1	Oteplení ze ztrát naprázdno	70
5.12.2	Oteplení ze ztrát nakrátko pro vnitřní vinutí 1	70
5.12.3	Oteplení ze ztrát nakrátko pro vnější vinutí 2.....	72

6.	Porovnání typů VN vinutí	74
6.1.	Porovnání podle ceny	74
6.2.	Porovnání podle činitele plnění VN vinutí.....	76
7.	Závěr	77

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Transformátory s „prstencovým“ (vlevo) a „plášťovým“ magnetickým obvodem, které navrhli O. T. Blathy, M. Déri a K. Zipernowsky [2]	13
Obr. 2-2 Jednofázový transformátor jádrového typu a plášťového typu [6]	15
Obr. 2-3 Základní struktura trojfázového jádrového transformátoru [7].....	15
Obr. 2-4 Transformátor s válcovým vinutím a deskovým vinutím [6].....	16
Obr. 2-5 Ideální transformátor [9]	17
Obr. 2-6 a) Skutečný transformátor naprázdno b) Jeho náhradní schéma [5]	19
Obr. 2-7 Náhradní schéma transformátoru při zatížení bez přepočítaných parametrů ani jednoho vinutí [5].....	20
Obr. 2-8 Náhradní schéma transformátoru s převedenými parametry sekundárního vinutí na počet závitů primárního vinutí [10]	21
Obr. 3-1 Řez suchým transformátorem od firmy SGB [11]	22
Obr. 3-2 a) Kruhový průřez jádra s technologií Step-Lap [13] b) Celá kostra transformátoru s tímto průřezem a se stahovací konstrukcí [14].....	25
Obr. 3-3 Celá výrobní linka pro výrobu jader od firmy Heinrich Georg GmbH Maschinenfabrik [12].....	26
Obr. 3-4 a) Rozložené části tvaru „U“ jednoho okna jádra zvané též „mama“ a „tata“ b) Celé trojfázové jádro vyrobené technologií Duocore [15]	27
Obr. 3-5 a) Stroj na navíjení fóliového NN vinutí b) Sklad hotových NN vinutí [11]	28
Obr. 3-6 Sklad hotových zalévaných vysokonapěťových vinutí [11]	30
Obr. 3-7 Schéma vinutí z vrstevných (polohových) cívek [11].....	31
Obr. 3-8 Schéma vinutí složeného z fóliových cívek [11]	31
Obr. 3-9 Schéma dvouskupinového vrstveného vinutí [11]	32
Obr. 3-10 Schéma sypaného vinutí [11]	32
Obr. 3-11 Schéma a směr navíjení diagonálního vinutí [11].....	33
Obr. 3-12 Schéma dvojdeskového (plynulého) vinutí [11]	34
Obr. 3-13 Schéma jednodeskového vinutí [11]	34
Obr. 4-1 Příčný řez dvěma fázemi transformátoru s popisky parametrů	37
Obr. 4-2 Podélný řez celým transformátorem s popisem parametrů	38

Obr. 4-3 Podélný řez jednou fází transformátoru	41
---	----

Seznam tabulek

Tab. 1 Vstupní parametry transformátoru.....	36
Tab. 2 Hodnoty pro výpočet odporu vinutí.....	52
Tab. 3 Hustota a měrné ztráty materiálu vinutí.....	53
Tab. 4 Vstupní parametry pro výpočet konkrétního suchého transformátoru	61
Tab. 5 Náklady na výrobu transformátorů s daným typem VN vinutí a zvoleným zdánlivým výkonem S_n	75
Tab. 6 Činitele plnění pro daný typ VN vinutí a zdánlivý výkon.....	76

1. ÚVOD

V dnešní době bereme všichni za samozřejmost, že si doma můžeme rozsvítit, nabít mobil nebo ohřát jídlo, aniž bychom museli vykřesat oheň v kamnech. Skoro každý člověk ví, že je to díky elektrické energii, která je vyráběna v elektrárnách a je do jejich domovů přivedena pomocí elektrického vedení, které mohou spatřit skoro na každé ulici. Přesto ale už ne tolik lidí ví, že přenos elektřiny mezi výrobnou a spotřebitelem zajišťuje ještě jeden nenahraditelný člen v tomto elektrizačním systému – transformátor. Tento elektrický netočivý stroj dokáže transformovat (odtud plyne jeho název) elektrické napětí v místě výroby na vyšší hodnotu a tím snížit ztráty na dlouhém elektrickém vedení a v místě spotřeby tuto hodnotu zase snížit na „bezpečnou“ hodnotu pro zásuvky s velmi vysokou účinností, tedy se zanedbatelnými ztrátami. Bez těchto strojů bychom museli mít elektrárnu co pár kilometrů nebo mít vedení s průřezem velikosti automobilového kola.

Pro tyto distribuční a přenosové účely bývají transformátory většinou olejového typu, ovšem jsou i místa, kde z bezpečnostních nebo ekologických důvodů tento typ být nemůže. V těchto místech se využívá tzv. suchých transformátorů. To jsou transformátory s vysokonapěťovým vinutím zalitým v tuhém izolantu.

Tato bakalářská práce se věnuje především tomu méně častému typu – suchým transformátorům využívaných v silnoproudé elektrotechnice, především v elektrické distribuci, od teorie až po reálnou výrobu.

V teoretické části pojednává o matematicko-fyzikálním popisu transformátoru, neboť pochopení fyzikálních dějů, které uvnitř transformátoru probíhají, je stavebním kamenem pro návrh konstrukce a její realizaci. Dále se práce věnuje popisu jednotlivých částí transformátoru a s tím související výrobou. Větší důraz je kladen na popis výroby vysokonapěťového vinutí, neboť provedení této části transformátoru velice ovlivňuje ostatní parametry konstrukce.

Následuje popis výroby jednotlivých částí až po finální zhotovení do jednoho celku. Větší důraz je kladen na popis výroby vysokonapěťového vinutí, neboť provedení této části transformátoru velice ovlivňuje ostatní parametry konstrukce a tím i výslednou cenu.

V průběhu let vzniklo mnoho technologií pro navíjení vinutí VN a výstupem této práce je porovnání těchto technologií a zhodnocení jejich výhod a nevýhod, např. která technologie je vhodná pro daný zdánlivý výkon transformátoru a jak se liší činitel plnění pro danou technologii.

2. TEORIE TRANSFORMÁTORŮ

2.1. Historie

Vznik transformátoru velice ovlivnilo objevení elektromagnetické indukce fyzikem Josephem Henrym v roce 1830. Koncem roku 1831 Michael Faraday provedl sérii pokusů se zařízením, které se skládalo z prstence ze železa a dvou vinutí z izolovaného měděného drátu, která na prstencem navinul. Ale protože na něm prováděl měření pouze se stejnosměrným napětíovým zdrojem, neobjevil možnost transformace, a tak neshledal toto zařízení využitelným [1].

Za první praktické využití transformátoru můžeme považovat napájení elektrických svíček od ruského elektrotechnika Pavla Nikolajeviče Jabločkova v roce 1876. Svíčky napájel pomocí sériově zapojených transformátorů s neuzavřeným magnetickým obvodem z feromagnetického materiálu. Princip elektromagnetické přeměny využili už mnohem dříve v přístrojích a zařízeních jiní vynálezci, ovšem feromagnetické jádro s dvěma galvanicky oddělenými vinutími pro čistě technické a energetické účely použil poprvé Jabločkov.

Transformátory s uzavřeným magnetickým obvodem, bližší současným, se začaly používat až později. Na takový transformátor byl vydán patent v roce 1884 v Anglii bratrům J. a E. Hopkinsovým. Široké praktické využití jednofázových transformátorů s uzavřeným magnetickým obvodem je však spojeno s maďarským závodem GANZ a comp., za což se zasloužili inženýři O. T. Blathy, M. Déri a K. Zipernowsky. V roce 1885 jako první zavedli název „transformátor“ a navrhli „prstencovou“ a „plášťovou“ konstrukci (viz Obr. 2-1). M. Déri dále navrhl první paralelní zapojení transformátorů. Tyto transformátory byly využívány pro osvětlovací jednofázová zařízení. Stále však byl problém s nalezením využití střídavého proudu pro pohon.



Obr. 2-1 Transformátory s „prstencovým“ (vlevo) a „plášťovým“ magnetickým obvodem, které navrhli O. T. Blathy, M. Déri a K. Zipernowsky [2]

Tento problém pomohli vyřešit téměř současně publikace od N. Tesly a G. Ferrarise v roce 1888, ve kterých se diskutovalo o vzniku točivého magnetického pole pomocí dvoufázového proudu i možnosti konstrukce motoru, který tento princip využívá. Zlomovým rokem pro rozvoj střídavých pohonů je rok 1889, kdy ruský elektrotechnik M. O. Dolivo-Dobrovolskij, navrhl trojfázovou soustavu proudu a sestavil první trojfázový asynchronní motor a také první trojfázový transformátor, jehož principu využíváme dodnes [3].

2.2. Význam a použití transformátorů

Transformátor je netočivý stroj pracující na principu elektromagnetické indukce, převádějící bez mechanického pohybu střídavé napětí a proud na jiné zvolené hodnoty. Při transformaci zůstává výkon nezměněn, pokud nepřehlídíme k jisté, celkem malé spotřebě ztrátového výkonu v samotném transformátoru. Tím, že jsou transformátory netočivé a tedy poměrně jednoduché, jsou na obsluhu i udržování méně náročné než točivé stroje a jsou i provozně spolehlivější.

Tyto dobré vlastnosti spolu s nutností použít vysokých a velmi vysokých napětí pro nejméně ztrátový přenos elektrické energie na velké vzdálenosti způsobily, že se elektrická energie na cestě od výroby až po spotřebič vícekrát transformuje, takže instalovaný výkon v transformátorech převyšuje instalované výkony ostatních elektrických strojů v energetickém rozvodu. Tím jsou výkonové transformátory důležitou složkou energetických systémů a vyrábějí se v rozmezí výkonů od zlomku kVA až po několik set MVA a horní mez se neustále zvyšuje [4].

Dále se používají regulační transformátory (autotransformátory) například v laboratořích pro plynulou regulaci. Pro měření vysokých hodnot proudu a napětí se používají měřicí transformátory. Zejména ve slaboproudé elektrotechnice se využívá speciálních transformátorů, mezi něž se řadí transformátory oddělovací, impulsní či přizpůsobovací. K transformátorům lze též přiřadit tlumivky a reaktory, které se jim konstrukčně podobají a využívají též elektromagnetické indukce, mají však pouze jedno vinutí [5].

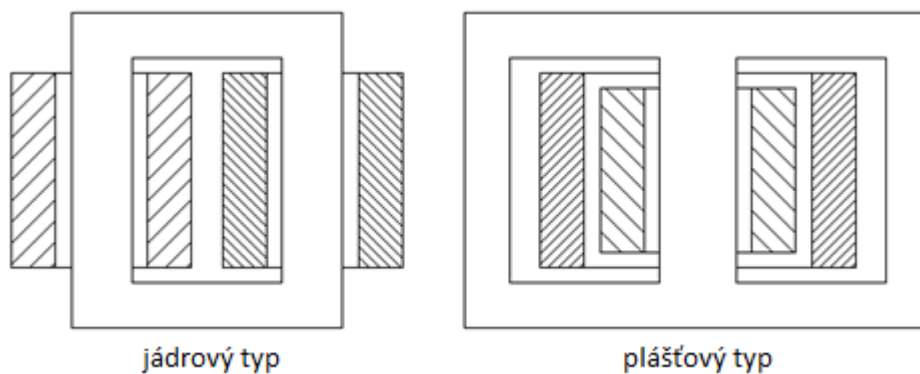
2.3. Konstrukční provedení transformátorů

Hlavními technickými částmi transformátoru je magnetický obvod, tvořený transformátorovými plechy, a vinutí. Každý transformátor má kromě toho další součásti, které slouží k mechanickému zajištění, izolování, chlazení a jiným účelům.

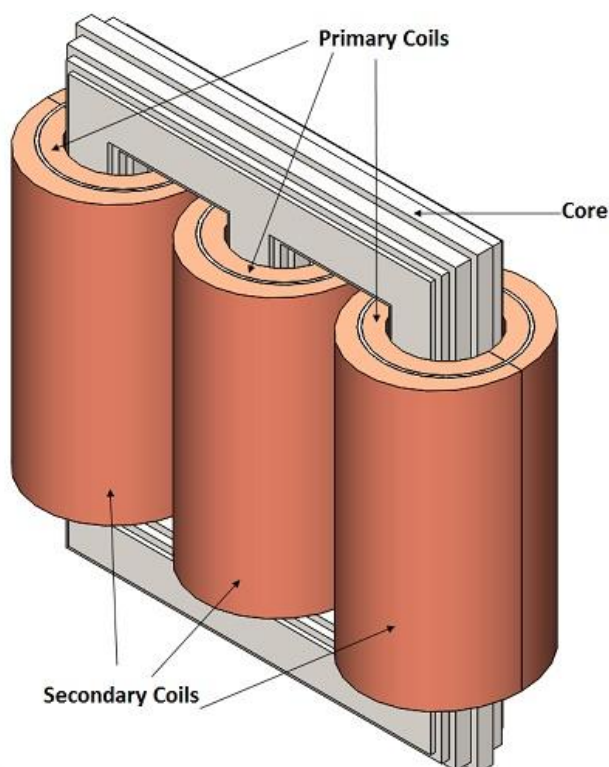
Pro konstrukční provedení je rozhodující, zda se jedná o jednofázový nebo třífázový transformátor (viz Obr. 2-3), ten se používá výhradně pro energetický rozvod, ovšem i zde má jednofázový transformátor využití.

Magnetický obvod transformátoru je vyroben ze stahovací konstrukce a feromagnetického materiálu, aby měl dobrou magnetickou vodivost, a z důvodu snížení ztrát vířivých proudů se skládá ze vzájemně izolovaných plechů, které se nazývají transformátorové plechy. Sloupce se nazývají jádru a na ně jsou nasunována jednotlivá vinutí. Vodorovné části kostry tvoří horní a dolní magnetická spojka (magnetické jho). Z hlediska uspořádání magnetického obvodu u jednofázových i trojfázových transformátorů je můžeme rozdělit na jádrový typ (viz Obr. 2-2), kde vinutí obklopuje jádro. Takto provedené jsou většinou trojfázové transformátory a u vyšších výkonů i jednofázové. Další uspořádáním je plášťový typ (viz Obr. 2-2), kde naopak jádro

obklopuje vinutí a magnetický obvod má ještě pomocná jádra na obou stranách, jejichž průřez je zhruba poloviční s průřezem hlavních jader [4]. Magnetický tok se souměrně rozděluje do spojek a také do obou pomocných jader. Výhodou jsou menší rozptyly, jednoduché navíjení na další cívku a poměrně snadné upevnění jádra. Nevýhodou je horší chlazení. Toto uspořádání se používá pro transformátory nižších výkonů (do 200VA). Občas se pro magnetický obvod transformátorů používá toroidní jádro nebo jádro ve tvaru C [5].

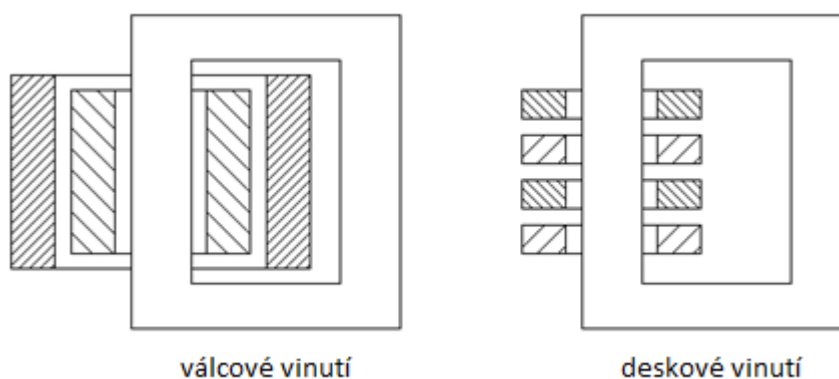


Obr. 2-2 Jednofázový transformátor jádrového typu a plášťového typu [6]



Obr. 2-3 Základní struktura trojfázového jádrového transformátoru [7]

Vinutí se nejčastěji dělá z izolovaného měděného nebo hliníkového vodiče na izolačních válcích z tvrzeného papíru, u vzduchových transformátorů se používá izolace vodičů lakováním. Vinutí můžeme rozdělit z hlediska konfigurace na dva základní typy – desková a válcová (viz Obr. 2-4). Deskové vinutí se skládá ze střídajících kotoučů cívek primárního a sekundárního vinutí [6]. U válcového vinutí se cívky navíjejí po celé délce jádra. U válcového vinutí se vinutí nižšího napětí nejčastěji umísťuje blíže železa a soustředně na něj vinutí vyššího napětí [5]. Transformátor, ať je jednofázový nebo vícefázový, má v každé fázi tj. na každém jádře, nejméně dvojí vinutí. Výjimku tvoří svářecí transformátory a jim podobné zkratuvzdorné transformátory. Transformátor však může mít i tři nebo více vinutí. Jednotlivá vinutí můžeme nazvat vstupní (primární), do něj výkon vstupuje, nebo výstupní (sekundární), z něj výkon vystupuje, ovšem daná označení nejsou pro transformátor charakteristické ani určující, neboť záleží na způsobu provozu a vinutí mohou změnit svou funkci [4].



Obr. 2-4 Transformátor s válcovým vinutím a deskovým vinutím [6]

Jednotlivým součástí transformátoru se práce věnuje podrobněji v kapitole 3 se zaměřením na suché transformátory.

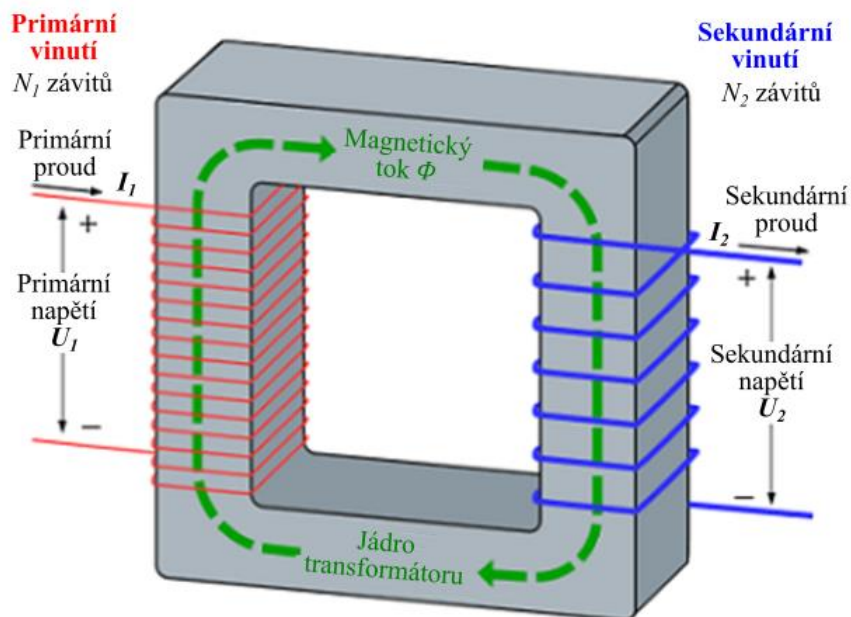
2.4. Princip činnosti transformátoru

Pro pochopení principu činnosti transformátoru je vhodné nejprve zanalyzovat tzv. ideální neboli bezztrátový transformátor, posléze při analýze uvažovat vliv ztrát. Pro nejjednodušší analýzu se transformátor nahrazuje obvodovým modelem, který se skládá z pasivních prvků R , L , C , zapojených tak, aby se chování modelu přiblížilo co nejvíce skutečnému transformátoru [5].

2.4.1 Ideální transformátor

Abychom mohli transformátor považovat za ideální, musí splňovat tyto podmínky:

- 1) Celkové ztráty a činné odpory jsou rovny nule
- 2) Nulový rozptyl magnetického pole, činitel vazby k je roven nule
- 3) Nulový magnetický odpor R_m magnetického obvodu (jádra) [8]



Obr. 2-5 Ideální transformátor [9]

Uvažujme transformátor se dvěma vinutími o N_1 a N_2 závitěch jako na Obr. 2-5. Ty jsou umístěná souose na jádrech magnetického obvodu, jsou spřažena s magnetickým tokem jádra, jenž je s časem harmonicky proměnný.

Okamžité hodnoty indukovaných napětí u_{i1} na primární straně a u_{i2} na sekundární podle druhé Maxwellovy rovnice jsou

$$u_{i1} = \frac{d\Psi_1}{dt} \quad (2.1)$$

$$u_{i2} = \frac{d\Psi_2}{dt} \quad (2.2)$$

kde Ψ_1 a Ψ_2 jsou spřažené toky jednotlivých vinutí a na základě druhé podmínky dostaneme vztahy s magnetickým tokem

$$\Psi_1 = N_1 \Phi \quad (2.3)$$

$$\Psi_2 = N_2 \Phi \quad (2.4)$$

Následně můžeme rovnice (2.1) a (2.2) upravit na tvary

$$u_{i1} = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.5)$$

$$u_{i2} = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.6)$$

Podělením vztahů (2.5) a (2.6) převod transformátoru k

$$k = \frac{u_{i1}}{u_{i2}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.7)$$

Harmonický časový průběh magnetického toku nechť je dán rovnicí

$$\Phi = \Phi_{max} \sin(\omega t + \alpha) \quad (2.8)$$

Kde Φ_{max} je amplituda magnetického toku, ω značí úhlovou frekvenci a α fázové posunutí čili rozdíl fáze vzhledem k sinusovce procházející počátkem. Dosazením za

magnetický tok Φ z rovnice (2.8) do rovnice (2.5) dostaneme časový průběh indukovaného napětí u_{i1}

$$u_{i1} = \omega N_1 \Phi_{max} \cos(\omega t + \alpha) = \omega N_1 \Phi_{max} \sin\left(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.9)$$

Z rovnice (2.9) je patrné, že časový průběh indukovaného napětí předbíhá magnetický tok Φ o 90° . Pokud jde o velikost indukovaného napětí, vychází z rovnice (2.9) pro jeho amplitudu

$$U_{max} = \omega N_1 \Phi_{max} \quad (2.10)$$

a efektivní hodnota napětí U_{i1} je dána vztahem

$$U_{i1} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega}{\sqrt{2}} N_1 \Phi_{max} = \sqrt{2} \pi f N_1 \Phi_{max} = 4,44 f N_1 \Phi_{max} \quad (2.11)$$

Totéž platí pro efektivní hodnotu napětí na sekundární straně U_{i2}

$$U_{i2} = 4,44 f N_2 \Phi_{max} \quad (2.12)$$

Rovnice (2.11) a (2.12) jsou v teorii transformátorů důležitým základním vztahem, z něhož se též vychází při jejich návrhu a dimenzování. Pro magnetické veličiny B (magnetická indukce), Φ se obvykle nezavádějí efektivní hodnoty, nýbrž je zvykem pracovat s hodnotami maximálními, B_{max} , Φ_{max} , vzhledem k tomu, že při nich dochází k maximálnímu nasycení feromagnetických materiálů.

Dosažením rovnic (2.11) a (2.12) do vztahu (2.7) můžeme převod získat z efektivních hodnot napětí

$$k = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.13)$$

Magnetický tok transformátoru zabírá plně, čili je spřažen se všemi závity všech vinutí transformátoru. Na jeho vybudění se podílejí proudy všech vinutí a vytvářejí tím výsledné magnetické napětí F_M , pro které platí

$$F_M = N_1 i_1 + N_2 i_2 = R_M \cdot \Phi = 0 \quad (2.14)$$

Kde R_M je magnetický odpor (reluktance) jádra, i_1 a i_2 jsou proudy procházející primárním respektive sekundárním vinutím. Při splnění 3. podmínky musí být výsledné magnetické napětí F_M rovno nule. Po úpravě rovnice (2.14) a zakomponování vztahu (2.7) dostaneme [4]

$$\frac{i_1}{i_2} = -\frac{N_2}{N_1} = -\frac{1}{k} \quad (2.15)$$

Jelikož se jedná o ideální transformátor, indukovaná napětí u_{i1} a u_{i2} jsou stejné jako svorková napětí u_1 a u_2 . Okamžitý celkový výkon transformátoru je dán součtem výkonů, které do vstupují do všech vinutí

$$p = p_1 + p_2 = u_1 \cdot i_1 + u_2 \cdot i_2 \quad (2.16)$$

Dosažením ze vztahů (2.7) za napětí u_2 a z (2.15) za proud i_2 dostaneme

$$p = u_1 \cdot i_1 + u_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot i_1 \cdot \left(-\frac{N_1}{N_2}\right) = 0 \quad (2.17)$$

Neboli

$$p_1 = -p_2 \quad (2.18)$$

Na základě tohoto vztahu (2.18) můžeme říct, že ideální transformátor se chová jako bezeztrátový prvek, tedy přenášený výkon je stejný na vstupních i výstupních svorkách,

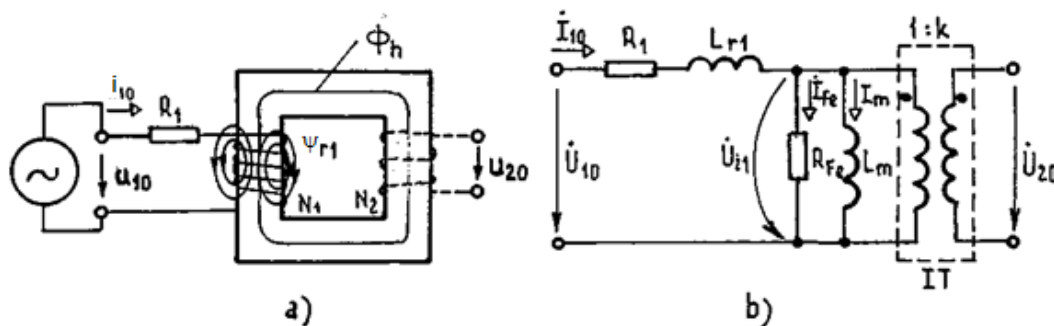
pouze transformuje hodnoty napětí a proudu. Vstupní vinutí připojené ke zdroji se chová jako spotřebič a výstupní jako zdroj.

Pokud budeme mít primární vinutí ideálního transformátoru připojené na zdroj harmonického napětí u_1 a sekundární vinutí rozpojené (naprázdno), hodnota proudu naprázdno i_{10} nutná pro vytvoření magnetického toku bude mít zanedbatelnou hodnotu, díky ideálnímu magnetickému obvodu ($R_M = 0$). Indukované napětí u_{i1} je stejně velké jako napětí zdroje u_1 a na sekundární straně se naindukuje díky magnetickému toku u_{i2} .

Když na sekundární vinutí připojíme zátěž Z , začne sekundárním vinutím protékat proud, který v jádře vytvoří magnetický tok působící proti původnímu magnetickému toku, což by znamenalo menší indukované napětí u_{i1} na primární straně a vznikl by rozdíl mezi tímto napětím na svorkách u_{i1} a napětím zdroje u_1 , proto primárním vinutí poteče větší proud, a to takový, aby se v jádře vytvořila původní hodnota magnetického toku nutná pro indukované napětí u_{i1} , které je rovno napětí zdroje u_1 [5].

2.4.2 Skutečný transformátor a jeho náhradní schéma

U skutečného transformátoru už musíme uvažovat ztráty v magnetickém obvodu, v odporu vinutí a rozptylové indukčnosti (magnetický tok jde i mimo jádro).



Obr. 2-6 a) Skutečný transformátor naprázdno b) Jeho náhradní schéma [5]

Uvažujme skutečný transformátor (viz Obr. 2-6), který má sekundární vinutí naprázdno. V takovém případě nemusíme uvažovat ztráty v sekundárním vinutí, protože jím neprotéká žádný proud. Celkový spřažený magnetický tok Ψ_1 primárního vinutí se pak skládá z toku hlavního Φ_h a rozptylového magnetického toku Ψ_{r1} . Hlavní tok se uzavírá přes magnetický obvod, zatímco rozptylový tok obepíná primární vinutí převážně vzduchem.

Pro svorkové napětí primárního vinutí tedy platí

$$u_{10} = R_1 \cdot i_{10} + \frac{d\Psi_1}{dt} \quad (2.19)$$

Kde

$$\Psi_1 = N_1 \cdot \Phi_h + \Psi_{r1} \quad (2.20)$$

Dosazením vztahu (2.20) do (2.19) vznikne

$$u_{10} = R_1 \cdot i_{10} + \frac{d\Psi_{r1}}{dt} + N_1 \cdot \frac{d\Phi_h}{dt} \quad (2.21)$$

Jestliže ze spřaženého toku Ψ a proudu I obecně vypočítáme indukčnost L ze vztahu

$$L = \frac{\Psi}{I} \quad (2.22)$$

pak dosazením do rovnice (2.21) a za předpokladu harmonických průběhů veličin můžeme napsat

$$U_{10} = R_1 \cdot I_{10} + j \cdot X_{r1} \cdot I_{10} + U_{i1} \quad (2.23)$$

Kde X_{r1} vyjadřuje rozptylovou reaktanci a vypočítá se

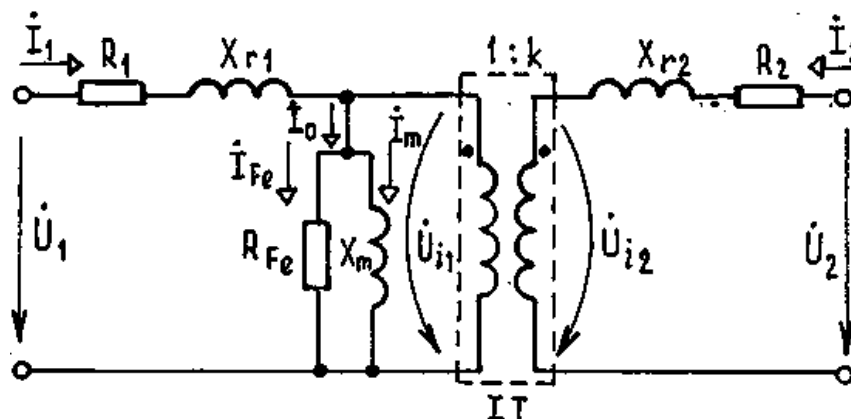
$$X_{r1} = L_{r1} \cdot \omega \quad (2.24)$$

L_{r1} je rozptylová indukčnost a z rovnice (2.23) je U_{i1} napětí indukované hlavním tokem Φ_h

$$U_{i1} = j \cdot \omega \cdot N_1 \cdot \Phi_h = j \cdot X_m \cdot I_{10} \quad (2.25)$$

Kde X_m je hlavní magnetizační reaktance. Na hlavním toku závisí ztráty a stupeň magnetizace feromagnetického materiálu. Ztráty v jádře jsou hysterezní a vířivými proudy a mají činný charakter a jejich vliv můžeme vyjádřit zařazením paralelního odporu R_{Fe} k magnetizační reaktanci. Ideální transformátor s převodem k použijeme v obvodovém modelu k vyjádření napětí naprázdno.

Připojíme-li k sekundárnímu vinutí zátěž, začne jím protékat proud. Podobně jako u primárního vinutí musíme počítat s odporem vinutí R_2 a s rozptylovou reaktancí X_{r2} a na obvodovém modelu je vyjádříme obdobně jak na primární straně při zapojení naprázdno viz Obr. 2-7.



Obr. 2-7 Náhradní schéma transformátoru při zatížení bez přepočítaných parametrů ani jednoho vinutí [5]

Ideální transformátor nemá žádné ztráty, v obvodovém schématu slouží pro převod odpovídajících veličin na základě počtu závitů. Vliv Ideálního transformátoru může přímo zahrnout do parametrů modelu a tento prvek ze schématu vyjmout. Tento postup se nazývá převod parametrů jednoho vinutí na počet závitů druhého vinutí a tyto veličiny se značí s čárkou.

Pro převod parametrů výstupního vinutí na počet závitů vstupního vinutí se bude postupovat následovně. Pro napětí musí zůstat jeho velikost na jeden závit zachována

$$\frac{U_2}{N_2} = \frac{U_2'}{N_1} \Rightarrow U_2' = U_2 \cdot \frac{N_1}{N_2} = U_2 \cdot k \quad (2.26)$$

Pro převedený proud I_2' platí, že musí na primárním vinutí vytvořit stejné elektromotorické napětí jako proud nepřevedený I_2 na sekundárním vinutí.

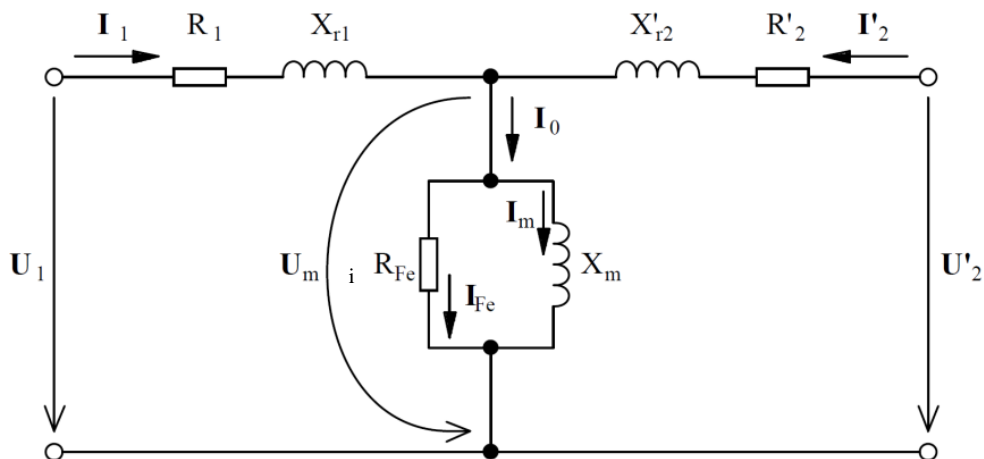
$$I_2 \cdot N_2 = I'_2 \cdot N_1 \Rightarrow I'_2 = I_2 \cdot \frac{N_2}{N_1} = I_2 \cdot \frac{1}{k} \quad (2.27)$$

Z rovnic (2.26) a (2.27) vypočítáme převedenou impedanci

$$Z'_2 = \frac{U'_2}{I'_2} = \frac{U_2 \cdot k}{I_2 \cdot \frac{1}{k}} = Z_2 \cdot k^2 \quad (2.28)$$

Z převedené impedance ((2.28) můžou být získány vztahy pro prvky R, L, C

$$R'_2 = R_2 \cdot k^2 ; L'_2 = L_2 \cdot k^2 ; C'_2 = C_2 \cdot \frac{1}{k^2} \quad (2.29)$$



Obr. 2-8 Náhradní schéma transformátoru s převedenými parametry sekundárního vinutí na počet závitů primárního vinutí [10]

Na základě Kirchhoffových zákonů můžeme náhradní schéma na Obr. 2-8 popsat rovnicemi

$$U_1 = R_1 \cdot I_1 + j \cdot X_{r1} \cdot I_1 + U_i \quad (2.30)$$

$$U_2 = R_2 \cdot I_2 + j \cdot X_{r2} \cdot I_2 + U_i \quad (2.31)$$

$$I_1 + I'_2 = I_0 = I_m + I_{Fe} \quad (2.32)$$

Pro převod parametrů primárního vinutí na počet závitů sekundárního vinutí platí následující vztahy

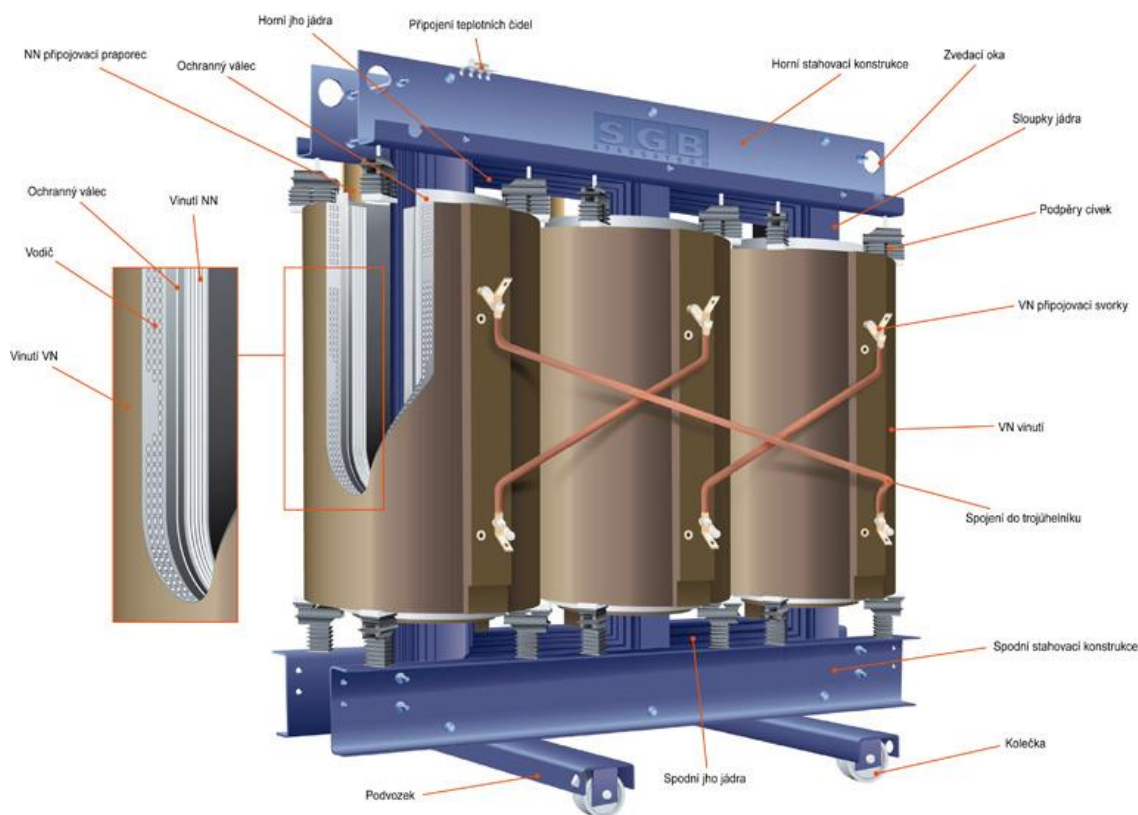
$$U'_1 = U_1 \cdot \frac{1}{k} ; I'_1 = I_1 \cdot k ; Z'_1 = Z_1 \cdot k^2 \quad (2.33)$$

A pro obvodové prvky primárního vinutí platí [5]

$$R'_1 = R_1 \cdot \frac{1}{k^2} ; L'_1 = L_1 \cdot \frac{1}{k^2} ; C'_1 = C_1 \cdot k^2 \quad (2.34)$$

3. VÝROBA VÝKONOVÝCH SUCHÝCH TRANSFORMÁTORŮ

Výroba výkonových suchých transformátorů probíhá tak, že se jednotlivé části transformátoru vyrábějí zvlášť a až poté je provedena montáž, při které se tyto části poskládají do sebe a zafixují, aby jako celek tvořily jeden kompaktní transformátor. Často ani neprobíhá výroba všech částí v jedné dílně nebo podniku, ale např. jádra a vinutím nižšího napětí jsou dovážena třeba i z jiného státu a výsledné transformátory jsou zkompletovány až v dílně, kde se vyrábějí v pryskyřici zalévaná vinutí vyššího napětí. Doba výroby jednoho transformátoru trvá přibližně týden [11].



Obr. 3-1 Řez suchým transformátorem od firmy SGB [11]

Kostra suchého výkonového transformátoru se skládá z magnetického obvodu, složeného z transformátorových plechů, z horní a dolní stahovací konstrukce vyrobených z ocelových U-profilů. Součástí kostry je také podvozek s kolečky. Stahovací konstrukce jsou mezi sebou sešroubovány svorníky. Horní a spodní stahovací konstrukci mechanicky spojují jádrové desky (ploché tyče), vytvořené z ocelové pásoviny. Konstrukčně je rám proveden tak, aby bylo jádro fixováno maximálně volně vůči namáhání v tlaku a tahu, neboť jedině tak bude mít vynikající vlastnosti ve vztahu ke ztrátám a hlučnosti. Podvozek podepírá spodní jho pomocí dílů z plastu zesílených skelnými vlákny. Dle požadavku na místo instalace mohou být vybrána další různá upevnění, jako např. vibrace redukující části. Do horní stahovací konstrukce jsou na obou stranách vyraženy zvedací

oka pro snadné a bezpečné zachycení do jeřábu a následný transport transformátoru, tak aby nebyl nijak poškozen působením zvedacích sil. Na kostře je také připevněna svorkovnice pro vývody z teplotních čidel či dalších měřicích komponentů [11].

Elektrický obvod se skládá hlavně ze zalévaného vinutí vyššího napětí a vinutí nižšího napětí. Bloky vinutí jsou k jádru připevněny a vycentrovány plastovými podpěrami (na jednu dvojici VN a NN vinutí vychází 4 podpěry dole i nahoře). Do vinutí jsou také zabudována měřicí čidla a mezi vinutí se dává ochranný válec zvaný izolační cylindr.

Tyto cylindry jsou mezi vinutí vkládány pro zmenšení izolační vzdálenosti mezi vinutími, která by jen ve vzduchu byla mnohem větší, což by se projevilo na průměru VN vinutí. Jejich další význam je oddělení tepelného ovlivňování VN a NN vinutí tak, aby každé vinutí mělo svůj teplotní spád. Cylindry jsou z polyesterového laminátu a jsou vyrobeny z několika vrstev polyesterové fólie, které jsou spojeny lepidlem [11].

Vinutí jsou také nahoře i dole opatřena přípojovacími svorníky s okem (svorkami) pro připojení VN a NN kabelů. Dále jsou použity vysokonapěťové tyče pro požadované zapojení vinutí do trojúhelníku, hvězdy či lomené hvězdy. Na nízkonapěťové straně se pro zapojení používá hliníkových případně i měděných pásovin. Na této straně se zapojení do lomené hvězdy už nepoužívá. Na VN cívce jsou také vyvedeny její odbočky, které se mohou zapojit dle potřeby. Odbočky jsou vyvedeny na závitové zdířky a jejich přepojování se provádí kovovou spojkou a šrouby [11].

Jednotlivé součásti jsou vyznačeny na transformátoru od firmy SGB na Obr. 3-1. Výroba nejdůležitějších součástí je rozepsána v dalších podkapitolách včetně průběhu jejich montáže do jednoho celku.

3.1. Jádro

Jádro ovlivňuje ztráty a velikost transformátoru a při jeho návrhu jsou nejzásadnější tyto parametry: ztráty naprázdno, hlučnost a proud naprázdno. Proto je nepostradatelný výběr vysoce kvalitních materiálů [11].

Pro výrobu se používají orientované plechy válcované za studena s izolační vrstvou typicky šedé barvy pod názvem Carlite. Tyto plechy jsou z magneticky měkkého materiálu, speciálně vyvinuté železo-křemíkové slitiny a mohou pracovat s indukci až 1,75 T. Carlite je finální úprava povrchu trafoplechu. Jedná se o 2-4 μm silnou vrstvu vznikající na obou stranách plechu a chránící před přídavnými vířivými proudy. Skládá se ze dvou vrstev. Základní vrstva má označení C2 (skelný film), která vzniká jako chemická reakce povrchu za vysokoteplotního žihání s MgO (oxid hořečnatý) a přetváří se na Mg_2SiO_4 (tetraoxokřemičitan dihořečnatý). Po konečném očištění dalším žiháním při 800-850 °C se nanáší finální fosfátová vrstva (C5) [11].

Typickým ztrátovým číslem pro plechy je 0,75 - 0,95 W/kg a tloušťka plechů se pohybuje v rozmezí 0,23 - 0,27 mm. Aktuálně se začíná používat i tloušťka 0,18 mm pro ještě větší snížení ztrát nebo při zvláštních aplikacích se dá použít tzv. Hi-B-plech, u kterého mohou být sníženy ztráty naprázdno o 15 % a hlučnost o 5 - 7 dB při stejných rozměrech. Hi-B-plechy jsou totiž ještě navíc legovány laserem, aby se rozbily magnetické domény [11].

Zajímavou alternativou pro materiál se jeví plech amorfní, který se u nás nevyrábí a je dovážený z Číny nebo Indie, protože jeho zpracování se zatím nedá provádět strojově, ale vyžaduje ruční práci [11].

Co se týče postupu výroby a skládání jader, existují dvě nepoužívanější technologie:

3.1.1 Step-Lap

Technologie Step-Lap je nejpoužívanější technologie pro výrobu magnetických obvodů v Evropě, jak už pro suché transformátory, tak i pro olejové. Název zjednodušeně znamená, že místa styku plechů spojky a sloupku jsou proti sousedním plechům stupňovitě přesazena [12].

Při tomto způsobu skládání se snižují lokální ztráty naprázdno při přechodu magnetického toku z jádrových do spojkových plechů, protože vlivem několikanásobného odstupňování se lokální magnetická indukce zvyšuje jen málo (například jedna mezera mezi 6 plechy) a tím se nezvyšují ztráty naprázdno [12].

Nejběžnější a nejpoužívanější vysekávací stroje pro tuto technologii jsou od německé firmy Heinrich Georg GmbH Maschinenfabrik (existují i další firmy, které se zabývají výrobou vysekávacích strojů, ale tato je technologicky nejdál). Tyto stroje stříhají pod úhlem 45° vzhledem k délce a výsledný vyřezaný plech má tvar pravouhlého lichoběžníku. Dříve se stříhalo pod úhlem 90° , ale v přechodech byly velké přídavné ztráty. Stroj také vysekává potřebné díry pro vystředění kolíkem a drážky pro spojení sloupků a jha. Plechy jsou postupně stříhány od nejužších po nejširší a následně zase po nejužší, ale tak, že u každé šířky se stříhá větší počet kusů, takže průřez výsledného sloupku má odstupňovaný tvar, a to tak, aby se co nejvíce přiblížil kruhovému (viz Obr. 3-2 a). Šlo by vyrobit téměř kruhový průřez tak, že by úplně každá vrstva měla jinou šířku, ale to by bylo finančně neefektivní. Proto se stříhá větší počet vrstev (plechů) hromadně se stejnou šířkou a tím se zmenší počet potřebných šířek plechu. Průřez jádra nesmí uzavírat celý kruh, ale je omezen průřezem vinutí nižšího napětí, kde jsou přidělané kovové pásoviny po celé délce vinutí jako vývody a proto se neuzavře celý kruh, aby byla zachována bezpečná přeskoková vzdálenost [12].

Vystřihnuté plechy jsou následně na sebe vrstveny (mohou být vrstveny ručně nebo automaticky, ruční práce je však stále rychlejší) a vystřed'ovány pomocí děr, drážek a kolíků tak, aby tvořily jednotlivá jádra a spojky, a ty jsou poté spojovány a fixovány do struktury „EI“ tak, aby šla horní spojka snadno oddělit a opětovně přidělat pro potřeby nasazování jednotlivých vinutí. Po nasazení vinutí je horní spojka pro zafixování na jádrech nalakována [12].

Výhodou technologie Step-Lap je jednodušší nasazování vinutí na jádra, neboť se nasazují na magnetický obvod ve vertikální poloze, tato poloha je zobrazena na Obr. 3-2 b).

Nevýhodou této technologie je jednoznačně cena vysekávacího stroje. Je několikanásobně větší než cena za vyřezávací stroj pro technologii Duocore. Nevýhodou jsou také větší ztráty naprázdno v dírách pro fixaci [12].



Obr. 3-2 a) Kruhový průřez jádra s technologií Step-Lap [13] b) Celá kostra transformátoru s tímto průřezem a se stahovací konstrukcí [14]

Výrobní linka na výrobu transformátorových plechů od firmy Heinrich Georg GmbH Maschinenfabrik, se skládá z děličky a vysekávacího (stříhacího) stroje [12].

Dělička začíná bubnem, na kterém je svitek navinutého plechu o velké šířce (jedná se o celý svitek plechu z válcoven a má šířku 1,5 m). Tento plech je postupně vymotáván a tažen do řezačky, kde je rozřezán na několik pásů s různou požadovanou šířkou a tyto pásy jsou opět navinuty na druhý buben, ze kterého jsou sejmuty do skladu [12].

Tyto svitky pak pokračují do stříhacího stroje, který je na Obr. 3-3, kde jsou opět nasazeny na buben a vymotávány. Následně se do nich vyrazí centrovací díry, drážky a na závěr stříhány pod úhlem 45° aby vznikly výsledné transformátorové plechy. Poté jsou vrstveny na úložném místě, ze kterého jsou odebírány pro stavbu konečného jádra [12].



Obr. 3-3 Celá výrobní linka pro výrobu jader od firmy Heinrich Georg GmbH Maschinenfabrik [12]

3.1.2 Duocore

Technologie vyvinutá firmou AEM Unicore Machinery v Austrálii, v Evropě se na suché transformátory nevyužívá, ale místo technologie Step-Lap je používána například v Severní Americe a v Asii [15].

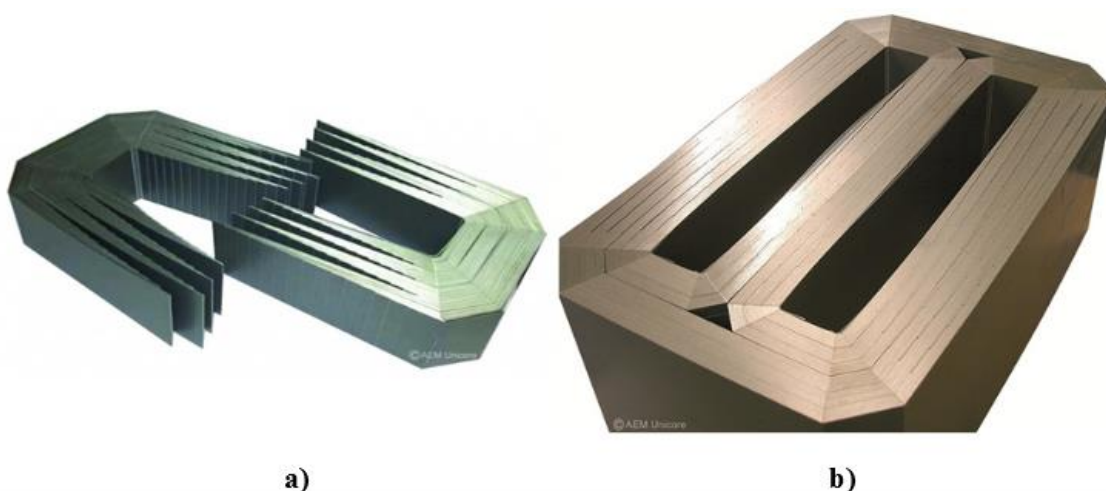
Transformátorové plechy jsou pootočené o 90° než u technologie Step-Lap, což zjednodušuje jejich výrobu a není třeba vyřezávat každý plech zvlášť v různé velikosti, nýbrž stříhá jeden dlouhý plechový pás na požadovanou délku a ten je následně ohýbán do tvaru „U“. Tyto ohnuté plechy jsou následně do sebe zasouvány způsobem, aby vzniklo „U“ o požadovaném průřezu (polovina výsledného průřezu jádra). Pro vytvoření jádra pro trojfázový plášťový transformátor se dvě hotové části tvaru „U“ do sebe zasunou do tvaru „O“ (viz Obr. 3-4 a). Celkový magnetický obvod vznikne spojením dvou stejných menších částí „O“ a ty se ještě uzavřou jednou velkou částí „O“, aby každý sloupek i spojka měly stejný průřez (viz Obr. 3-4 b). Jádro je z jednotlivých částí skládáno ve vertikální poloze [15].

Výhodou by měly být také nižší ztráty v magnetickém obvodu, protože není třeba děr na zafixování, dále snížení vynaložené práce na výrobu a snížení odpadu sestávajícího z odřezků železných plechů [15].

Velikou nevýhodou však je, že se aktuálně nedá docílit kruhového průřezu jádra, ale pouze čtvercového. Kruhového průřezu by šlo docílit postupným podkládáním jednotlivých vrstev a museli by být následně zafixovány, což by bylo pracné a neefektivní. Technologie by tak přišla o své výhody. Čtvercovému průřezu jádra také musí být přizpůsobena vinutí, takže musí mít větší průměr, aby byla dostatečná

přeskoková vzdálenost mezi jádrem a NN vinutím, než kdyby byl průřez kruhový, a tím je transformátor větší, tedy dražší. Nebo se používají vinutí hranatějšího tvaru, ale ta jsou při zkratu zatěžována většími deformačními silami, takže vyžadují větší fixaci tvaru. Takto upravená vinutí jsou např. v Asii. Další nevýhodou je komplikovanější nasazování vinutí na jádro, protože již nejde oddělit pouze jedno horní jho a vinutí musí být nasazována ve vertikální poloze (Přesněji řečeno jádro je vkládáno do vinutí na rozdíl od technologie Step-Lap) [15].

Při vyhodnocení výhod a nevýhod je vhodná tato technologie pro výrobu transformátorů nižších výkonů (horní hranice se pohybuje mezi 25 až 250 kVA) [15].



Obr. 3-4 a) Rozložené části tvaru „U“ jednoho okna jádra zvané též „mama“ a „tata“ b) Celé trojfázové jádro vyrobené technologií Duocore [15]

3.2. Vinutí nižšího napětí

Vinutí nižšího napětí se skládá ze tří složek. Tou první je měděná nebo častěji používaná hliníková fólie, která snižuje vliv skin efektu. Další složkou je polyesterová fólie napuštěná pryskyřicí tzv. Prepreg. Vodivá fólie je spolu s Prepregem navinuta do svitku a vytvrzena v peci po dobu jedné až dvou hodin. Prepreg je před vytvrzením měkký, takže se dá jednoduše svinout, ale po vytvrzení v něm pryskyřice ztvrdne a Prepreg je pak neohebný. Třetí složkou jsou pak hliníkové nebo opět měděné pásoviny, které slouží jako vývody a jsou přilísavány (svařeny za studena) k fólii během navíjení. Navíjecí stroj (viz Obr. 3-5 a) přesně podle naprogramovaného výpočtu navíjení zastaví, aby se vložila pasovina na začátku i na konci navíjení, aby byly přidělané oba vývody. Díky vytvrzení je vinutí kompaktní a tvoří velmi pevný silnostěnný válec, který může, na rozdíl od běžných provedení, samostatně čelit radiálním zkratovým silám. Jednoduché uchycení k jádru pomocí plastových podpěr slouží pouze k vycentrování. Jedinými živými částmi, která z vinutí vystupují, jsou vývody [11].

Fóliové vinutí má tyto výhody:

- Snížení dodatečných ztrát
- Vyrovnané rozložení teplot ve vinutí
- Vysoká zkratová pevnost

Izolační fólie vinutí NN má větší axiální šířku nežli vodivá fólie. Na obou koncích vinutí tak vzniká malá mezera, do které se současně s vodivou fólií navíjí izolační pásy stejné souhrnné tloušťky jako vodivá fólie. Tím je mechanicky zesílen okraj kompletního foliového vinutí. To je důležité, aby stlačovací elementy (plastové bloky), které fixují polohu vinutí NN v okně, nedeformovaly přesahující izolační fólie a vinutí bylo pevně zafixováno [11].

Když působení zkratových sil ve vnitřní vinutí NN rozdělíme na radiální a axiální složku zkratové síly, můžeme konstatovat, že radiální složka působící dovnitř vinutí NN je zachycena pevností vytvrzeného vinutí NN a axiální složka zkratové síly je zachycena mechanickou pevností materiálu folie [11].

Jiné technologie jsou většinou použity z technických důvodů jen u výkonů nižších než 160 kVA a pro napětí vyšší než 3 kV. Dříve se místo vodivé fólie používal navíjený drát, přechod na fólii ale výrobu urychlil [11].

Nutným předpokladem pro elektrickou spolehlivost jsou hrany fólie i papíru bez odřepů, což klade vysoké nároky na kvalitu při válcování [11].

Pro spojení výstupní přípojnice s pásem vinutí existují dvě běžné metody, a sice svařování pod ochrannou atmosférou nebo svařování za studena pod vysokým tlakem (400 kN) [11].

Výhody svařování za studena:

- Žádné metalurgické změny vodivého materiálu vlivem teplotního procesu
- Žádná cizí tělesa, které mohou vzniknout během svařování

Hotové vinutí nižšího napětí je zobrazeno na Obr. 3-5 b).



Obr. 3-5 a) Stroj na navíjení foliového NN vinutí b) Sklad hotových NN vinutí [11]

3.3. Vinutí vyššího napětí

Suché transformátory se vyznačují tím, že VN vinutí je kompletně uzavřeno v pryskyřicovém tělese s hladkým povrchem. Zalévání probíhá v železných formách pod vakuem, aby v pryskyřici nevznikaly bubliny a nedošlo tak k nedostatečnému odizolování závitů nebo nedocházelo k částečným výbojům, protože největším problémem VN vinutí je izolace vysokého napětí [11].

Forma se skládá ze spodního podstavce, na který se nejprve přidělá vnitřní válec, na který se nejprve navine vnitřní vrstva síťky ze skleného vlákna a na ni se navinou závitů z hliníkového nebo měděného drátu nebo folie (záleží na technologii). Během navíjení se také vytahují odbočky. Navíjení se zastaví a na požadovaném závitě se připájí nebo

svařuje za studena drát, který vytvoří odbočku. Po navinutí se přidá vnější vrstva skelné sítě a následně nasadí vnější válec, který je na jedné straně oddělený aby šel snadno přetáhnout přes vinutí, a po nasazení je spojen spojku z pásoviny, ve které jsou díry pro jednotlivé odbočky, do nich se přivedou připájené dráty, a spojka je přišroubována ke spodnímu podstavci [11].

Po navinutí se forma nahřeje na stejnou teplotu jako má směs pryskyřice a vloží se do zalévací komory. Formy se zahřívají, aby pryskyřice neztuhla a zatekla všude tam, kam by měla, protože při pokojové teplotě je velice hustá. V komoře se do forem zavedou hadice pro přívod pryskyřice a následně se komora hermeticky uzavře a vysaje se z ní vzduch, aby vzniklo vakuum. Poté se do formy přes hadici nalije čerstvě namíchaná směs pryskyřice a po naplnění se formy vytáhnou a dají do peci na vytvrzení pryskyřice. Vytvrzování probíhá pomalu, aby pryskyřice měla správné vlastnosti. Proces vytvrzování je přesně definovaný použitým zalévacím materiálem. Při rychlém vytvrzení pryskyřice může mít až poloviční dielektrické vlastnosti, pevnosti nebo houževnatosti. Pro pryskyřici s křemičitým pískem vytvrzování trvá 24 hodin při teplotách od 85°C až do 140°C, kdy se teplota postupně zvyšovala. Po dokončení vytvrzení se musí rychle odstranit forma ze zalévaného vinutí. Vnější válec se poměrně snadno sejme po odšroubování spojky, poté se odstraní další šroub, který spojuje vnitřní válec a podstavec. Následně se celé vinutí se zbylou formou nasadí do speciálního zařízení, které vnitřní válcovou formu vytahuje směrem nahoru a vinutí zároveň tlačí směrem dolů. Vnitřní válec je přitom z vnitřní strany jemně ostříkovan rozprašovanou vodou. Při ostříkování se vnitřní válec pomalu vysouvá z vinutí. Tato operace se musí provést rychle, aby vinutí zůstalo teplé a ostříkovaním vodou se ochladila jen vnitřní část formy a ta se změnou teploty zmenšila rychleji než vinutí v pryskyřici a šla tak vytáhnout. Pokud se vnitřní část nepodaří vyndat napoprvé (např. díky špatně zpracovanému povrchu formy) dá se vinutí se zbylou formou opět nahřát do pece a celý proces s odstraňováním formy se opakuje [11].

Po odstranění všech forem se VN vinutí nechá vychladnout a následně jsou zabroušeny jeho ostré hrany a celý válec vinutí je vyleštěný transformátorovým olejem, aby na něm nebyl prach a nesnížily se jeho izolační vlastnosti. Hotové vinutí je k nahlédnutí na Obr. 3-6 [11].

Pryskyřice se skládá ze dvou základních složek, tedy z pryskyřice (např. látka Araldit) a tvrdidla (např. Aradur), a případně dalších pojiv a aditiv na urychlení vytvrzování. Všechny tyto složky se těsně před nalitím do forem smíchají. Na výrobu zalévacího materiálu se specializuje např. Huntsman International LLC [16].

Jak už bylo zmíněno, pryskyřicové těleso z obou stran zpevňují síťky ze skelného vlákna. Samotná pryskyřice je velmi křehká, s touto výztuží je však kompaktní, pevnější a odolnější. Skelná vlákna drží těleso pohromadě při účinku zkratových sil nebo při velkých teplotních změnách jako je např. zapínání transformátoru při nízkých teplotách okolí [16].

Rozdílná velikost teplotní roztažnosti vodivého materiálu vinutí a pryskyřice by samotnou pryskyřici při náhlých velkých změnách zatížení výrazně poškodila (rozerváním). Pro eliminaci tohoto jevu při použití hliníkového vinutí se do pryskyřice přidává křemičitý písek drcený na velmi malou zrnitost. Při správném poměru tohoto aditiva v pryskyřici má tato směs podobnou teplotní roztažnost jako hliníkové vinutí. Pro docílení výdržnosti teplotních změn při použití měděného vinutí se křemičitý písek nepoužívá, ale veškerý prostor mezi a kolem vinutí se vystele skelným vláknem. Tato metoda je ovšem velmi pracná a časově náročnější (používá ji např. SGB či ABB), proto se častěji používá hliníkového vinutí a pryskyřice s křemičitým pískem [16].



Obr. 3-6 Sklad hotových zalévaných vysokonapět'ových vinutí [11]

Další technologií pro výrobu VN vinutí je bez použití pryskyřice, kde se zalévací směs nahradí izolační fólií napuštěnou pryskyřicí, kterou se jednotlivé závitů i celá cívka obalí a nechá vytvrdit v peci podobně jako zalévané vinutí pod vakuem. Fólie musí mít vysokou třídu hořlavosti a potřebné izolační vlastnosti. Tuto metodu lze použít spíše pro transformátory s primárním vinutím na nižší napětí [11].

Při uvažování stejných výkonů a také napětí, rozměry celého transformátoru (především výšku) určuje hlavně zalité vinutí vyššího napětí a jeho rozměry určuje především typ technologie navíjení.

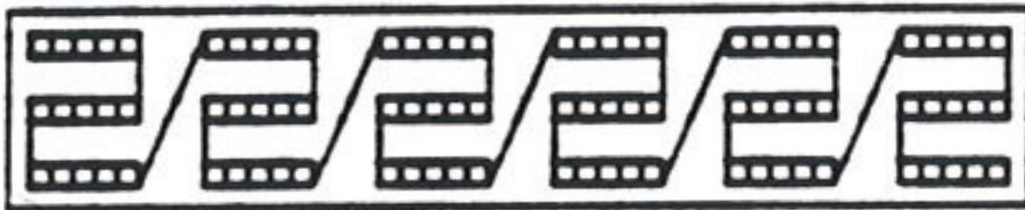
3.3.1 Vinutí z vrstevných (polohových) cívek

Tato technologie vychází z historie výroby, kdy se nejprve navinula první vrstva se stejným průměrem závitů v axiálním směru až na konec cívky, kde se směr navíjení v axiálním směru otočil, a pokračovalo se druhou vrstvou závitů na větším průměru a tak se pokračovalo ve vrstvení, dokud nebyl navinut požadovaný počet závitů. Problémem pak byl velký napět'ový rozdíl potenciálů mezi radiálně mechanicky sousedními vodiči na začátku a na konci vrstev [11].

Tento problém řeší rozdělení vinutí na cívky zapojené do série, jak jsou znázorněny na Obr. 3-7, kde je délka jedné cívky (vrstvy v axiálním směru) omezena výdržností lakové izolace vodiče v nejnámáhanějších místech (na koncích cívky), aby byla dostatečná bezpečnost proti průrazu. Šířka cívky v radiální ose, tedy počtem vrstev, je omezen nutným chlazením bloku. Mezi bloky se dělá mezera, o jejíž velikosti rozhoduje taktéž rozdíl potenciálů. Jenže tyto mezery jsou důsledkem velmi špatného činitele plnění vinutí a transformátory vyrobené touto technologií se vyznačují velkými rozměry směrem do výšky a tím stoupá cena kvůli většímu množství použitého materiálu na jádro. Tuto technologii dříve používaly firmy jako ČKD, ABB a používala se i v nezalévaném provedení vinutí, vyráběné pro napětí řádově do 10 kV [11].

Pro navíjení se volí lakovaný drát s jednou nebo dvojitou vrstvou lakové izolace. Většina výrobců dává přednost hliníku kvůli jeho nižší a stabilnější ceně na burze a dá se

predikovat její průběh a navíc má menší hustotu, takže stejný počet závitů vyjde levněji, než kdyby byly z mědi [11].



Obr. 3-7 Schéma vinutí z vrstevných (polohových) cívek [11]

3.3.2 Vinutí složené z fóliových cívek (kotoučové vinutí)

Technologie fóliových cívek je vylepšením vrstevných (polohových) cívek. Celá cívka vrstevného vinutí z profilových vodičů se nahradí cívkou navinutou hliníkovou folií a mezi vrstvami se pro izolaci nalézá polyesterová folie (viz Obr. 3-8). Cívky jsou navinuty podobnou technologií, jakou je vyrobeno NN vinutí. Omezený počet závitů v dílčí foliové cívce snižuje elektrické namáhání mezi sousedními cívkami. Kanál mezi cívkami, kterým prochází propojení nejspodnější folie (v radiálním směru) a nejvrchnější folie sousední cívky musí udržet elektrické namáhání mezi cívkami a zvětšuje plochu pro chlazení vinutí. Všechny konce navinutých bloků jsou vyvedeny na jednu stranu a jsou svařeny najednou, což urychluje výrobu. Přilítá pryskyřice následně jen obteče tyto cívky a s fóliemi nijak nereaguje [11].

Dnes se jedná o nejpoužívanější princip výroby suchých transformátorů, původně byl patentem firmy Siemens, ale přebraly jej další firmy po celém světě, např. v Číně, Japonsku a Itálii. Pořád ale má nízký činitel plnění, na druhou stranu má vysokou výrobní rychlost [11].



Obr. 3-8 Schéma vinutí složeného z fóliových cívek [11]

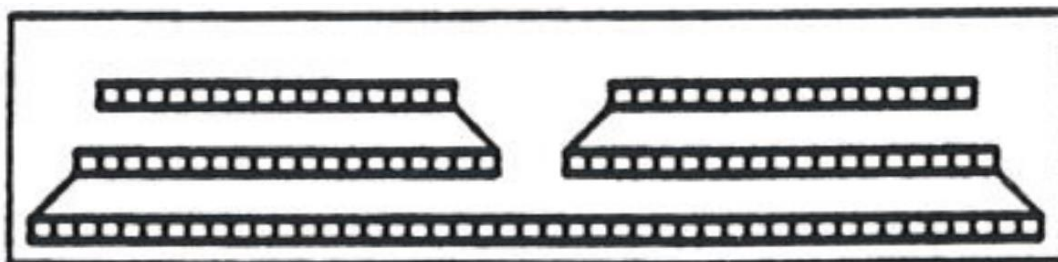
3.3.3 Dvouskupinové vrstvené vinutí

Technologie, která vzešla z principu použitého u olejových transformátorů. Jedná se o navíjení po vrstvách a pro odizolování se mezi vrstvy vkládá skelné vlákno a pro vyrovnání zkratových sil působících na NN vinutí a lepší chlazení, se VN vinutí rozděljuje na dva symetrické bloky. Princip je znázorněný na Obr. 3-9. Při zalévání se mezi některé vrstvy dají vložit železné tyče, které se po vytvrzení odstraní a vzniknou tak dodatečné chladicí kanálky [11].

Vliv vložených chladicích vzduchových kanálů vytvořených uvnitř zalévaného vinutí zvětšuje chladicí plochu vinutí a tím snižuje oteplení uvnitř vinutí. Hlavní přínos spočívá v tom, že se dovolené oteplení docílí s větší proudovou hustotou ve vodičích vinutí. Pokud by vinutí neobsahovalo vnitřní chladicí kanály, musela by se použít nižší proudová hustota ve vodičích a tímto i větší váha vodičů [11].

Vlivem vnitřních chladicích kanálů se nezmenší vnější rozměry cívek, protože vzduchové kanály musí mít minimálně 11 mm šířku, aby vůbec chladily. Často se používá i větší šířka chladicích kanálů, aby se zlepšila účinnost chlazení. Vytvořit chladicí kanálky je však velice pracné [11].

Dnes se technologie používá pro výkony řádově v jednotkách MVA a vodič má kruhový i obdélníkový průřez. Touto cestou se vydaly firmy SGB Regensburg a ABB Brilon [11].

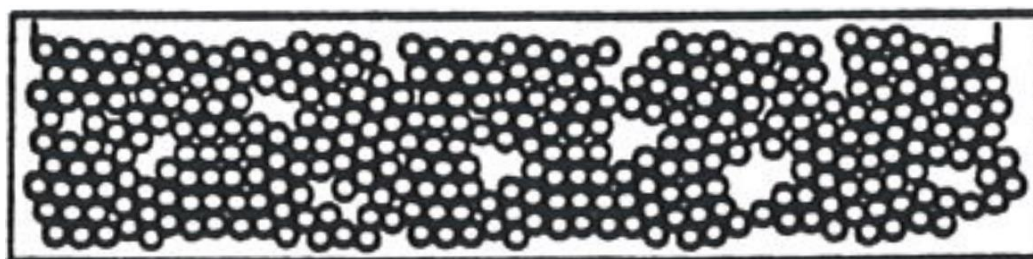


Obr. 3-9 Schéma dvouskupinového vrstveného vinutí [11]

3.3.4 Sypané vinutí

Navíjení technologií sypaného vinutí probíhá ve vertikální poloze a používá se výhradně vodič s kruhovým průřezem. Nad formou je expandér, který krouží závit o předdefinovaném průměru, a následně předtočený závit padá samotížně gravitací dolů. Závit jsou krouženy po horizontálních vrstvách (v radiální rovině), takže expandér vykrouží nejprve závit o nejmenším průměru, následující závit o větším průměru a tak dále dokud se nedosáhne maximálního průměru u vnější strany válce, pak se začnou kroužit další závit opačným směrem (do středu válce) a každou otáčkou se průměr zmenšuje. Tento postup se opakuje, dokud se nedosáhne požadovaného počtu závitů a to by mělo být vypočtené těsně před koncem horního okraje pryskyřicového válce. Tento způsob ukládání závitů má samozřejmě jisté odchylky (viz Obr. 3-10), ale je kontrolovaný, takže by se neměly potkat závit s velkým rozdílem potenciálů. Při navíjení se vždy po určitém vykrouženém počtu závitů musí nově vzniklé závit svázat, aby se nerozsypaly při vyndávání formy z navíječky, a tyto provázky mají také funkci knotu, takže tahají při zalévání pryskyřici mezi závitů [11].

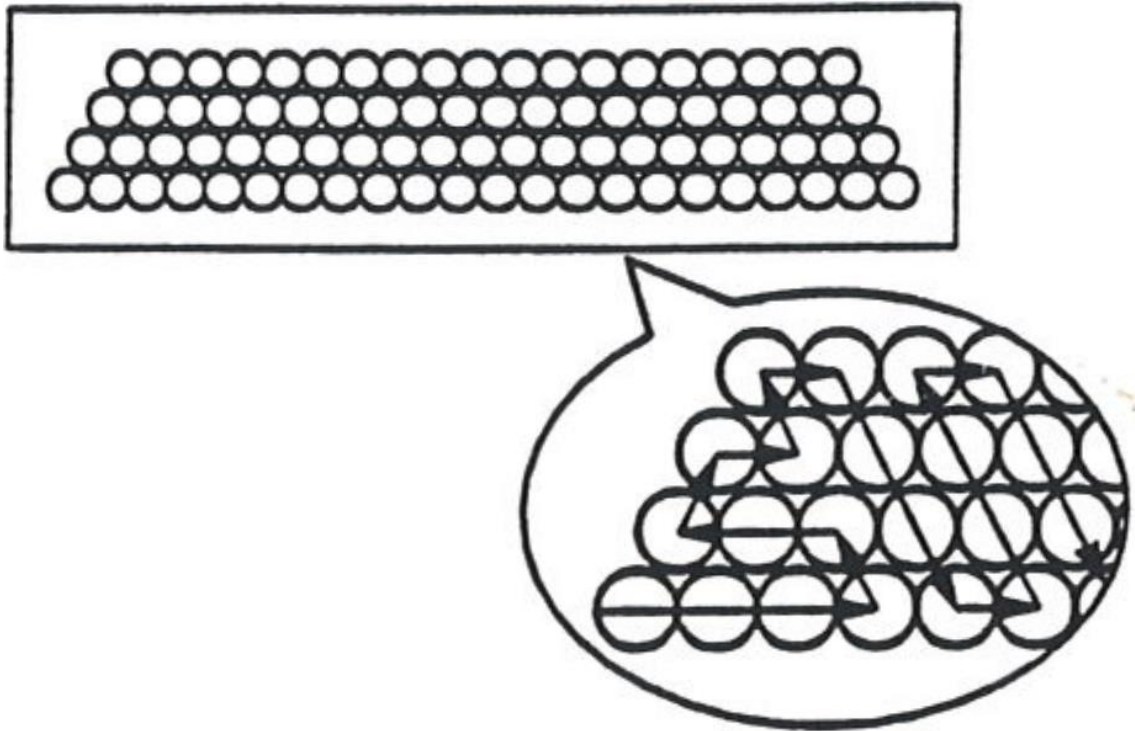
Sypané vinutí používá např. France Transfo nebo dílna SGB Czech Trafo s.r.o. v Olomouci (dříve ve Frýdku-Místku) [11].



Obr. 3-10 Schéma sypaného vinutí [11]

3.3.5 Diagonální vinutí

Jedná se o řízené navíjení, kdy se nejprve navine polohová cívka ve tvaru pyramidy a následně se vine podobným principem jako u sypaného vinutí a z horního závitu pyramidy se pokračuje v radiálním směru do středu a následně zase na kraj cívky pod úhlem přibližně 60° od axiální osy. Názorná ukázka je na Obr. 3-11. Tímto způsobem není nutné přidávat do vinutí mezipolohovou izolaci a ušetří se místo, tedy zvýší se činitel plnění. Počet závitů směrem do šířky je daný sousedními vodiči, aby mezi nimi nepřesáhlo napětí dovolenou hodnotu [11].

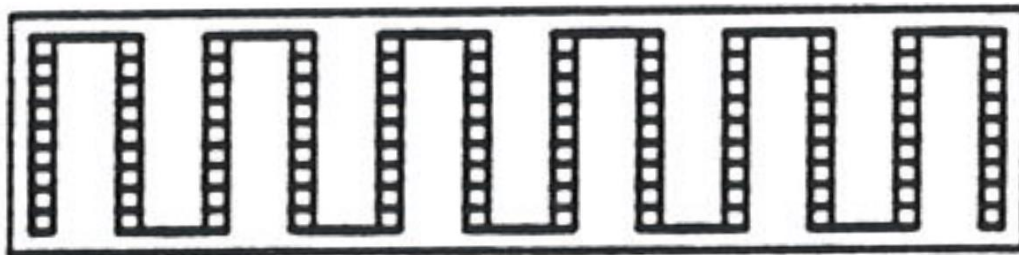


Obr. 3-11 Schéma a směr navíjení diagonálního vinutí [11]

3.3.6 Dvojdeskové (plynulé) vinutí

Navíjení vinutí je komplikované, protože jedna deska vinutí, kde závity v elektrickém sledu se vzdalují od jádra, se navíjí jednoduše z menšího průměru na větší. Druhá deska vinutí se navine na šablonu o větším průměru a potom se přehazuje tak, aby se závity v elektrickém sledu přibližovaly ke středu. Výhoda tohoto vinutí spočívá v tom, že se nemusí vodič stříhat a napojovat (proto název plynulé vinutí). Používá se na výrobu transformátorů s primárním vinutí na větší napětí, cca od 20 kV [11].

Výhradně se používají vodiče obdélníkového průřezu se zaoblenou hranou.

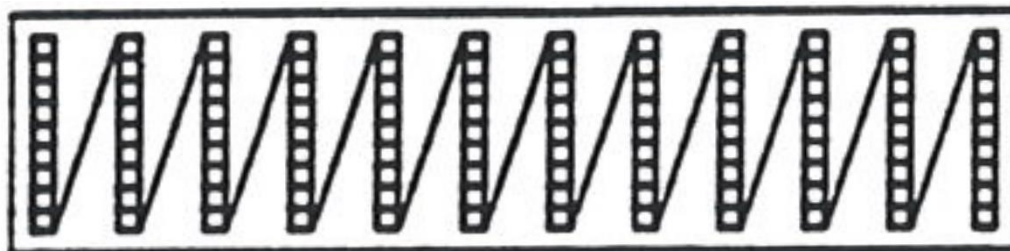


Obr. 3-12 Schéma dvojdeskového (plynulého) vinutí [11]

3.3.7 Jednodeskové vinutí

Všechny desky se navíjí jednoduše z vnitřního průměru na vnější. Komplikace představuje propojení z vnějšího na vnitřní průměr mezi deskami. Přechod mezi deskami je veden v kanálu mezi sousedními deskami.

Stejně jako u dvojdeskového vinutí se zde používá výhradně vodič obdélníkového průřezu se zaoblenou hranou [11].



Obr. 3-13 Schéma jednodeskového vinutí [11]

3.4. Montáž

Po výrobě jednotlivých částí je třeba složit je dohromady, aby tvořily jeden kompaktní transformátor. Nejprve se z jádra sejme horní stahovací konstrukce, kterou je třeba rozšroubovat a následně ji ručně přemístit např. na dřevěnou paletu, aby se nepoškrabala. Následně se sejme horní jho, které se chytne dvěma popruhy a ty jsou ukotveny do jeřábu. Popruhy na sobě mají navlečenou plastovou ochranu, aby se do nich plechy nezařezávaly. Jho se pak jeřábem opatrně vytáhne směrem nahoru a položí opět na paletu, kde se do děr pro šrouby vloží kolíky, aby se nerozpadl tvar jha [11].

Po odstranění horního jha se nasazují jednotlivá vinutí. Nejprve se však musí připravit dolní plastové podpěry, které se přišroubují ke spodní stahovací konstrukci. Pokud má vinutí nižšího napětí vývody dole, nasazují se jako první. Do vinutí jsou provlečeny dva popruhy, které jsou delší než ty na zvedání jha a za ně se vinutí uchyty do jeřábu a poté jsou vinutí pomalu nasazována na jednotlivá jádra. Při nasazování se dbá, aby vinutí vevnitř nezavadilo o jádro, a při dosedání na podstavce, aby bylo správně vycentrováno. Stejný proces se aplikuje na vinutí vyššího napětí. Pokud vinutí nejsou stejně vysoká, ale mají výrobní odchylky, tak se nejnižší vinutí nasazuje na střední sloupek transformátoru, aby se vyšší vinutí lépe chladila. Pokud má NN vinutí vývody nahoře, musí se nejprve nasadit VN vinutí a teprve pak se nasazuje NN. Tato varianta je ale složitější, protože se vinutí musí pouštět mezi jádro a VN vinutí a velmi obtížně se NN vinutí centruje.

Po nasazení NN i VN vinutí se opatrně nasadí i horní jeho obdobným postupem, jako při jeho sundávání, jen pozpátku, a následně je z vnějšku nalakováno, aby bylo lépe zafixováno ke sloupkům. Po uschnutí laku se nasadí horní stahovací konstrukce, která je upevněna šrouby a ty jsou utaženy na požadovaný moment. Pro upevnění vinutí se musí přišroubovat horní plastové podpěry, případně se ještě před tím změří a poopravuje vycentrování vinutí.

Na závěr se přidělají šroubováním VN tyče a pásoviny pro získání požadovaného trojfázového zapojení vinutí. Dále se dají dle požadavku přidat další upevňovací části nebo se transformátor může vložit do skříně [11].

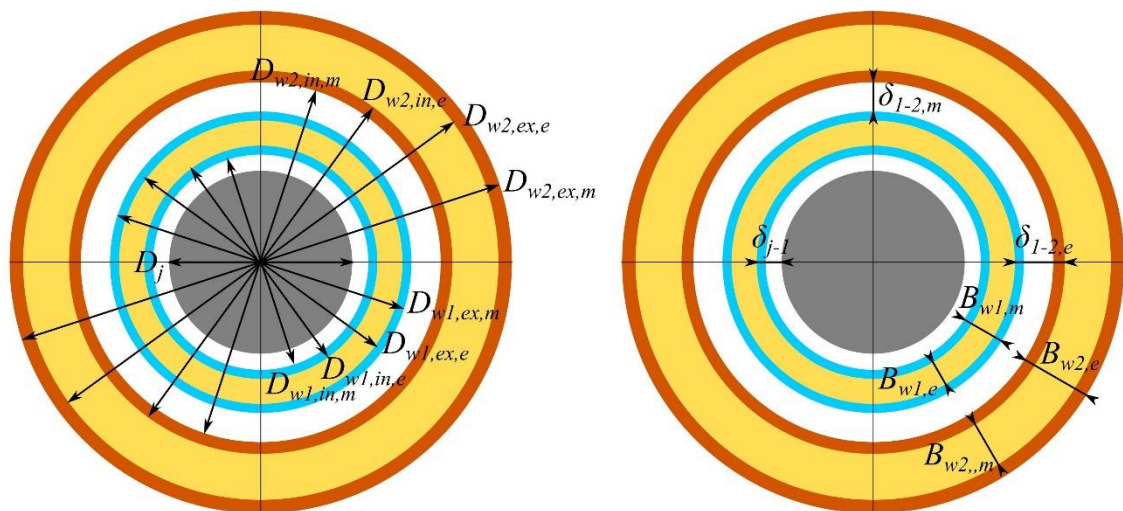
4. NÁVRH SUCHÉHO VÝKONOVÉHO TRANSFORMÁTORU

Pro návrh jsou rozhodující vstupní parametry požadované od zákazníka v poptávce a objednávce. Jsou uvedeny v normách [17] a [18]. Naprosto nejnütnější jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1 Vstupní parametry transformátoru

Název parametru	Značení	Jednotka	Poznámka
Jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru	S_n	[VA]	
Jmenovité napětí primární strany	U_{n1}	[V]	
Jmenovité napětí sekundární strany	U_{n2}	[V]	
Rozsah odboček	ro	[%]	zpravidla ($\pm 5\%$)
Jmenovitý kmitočet	f_n	[Hz]	(50; 60; $16^{2/3}$ Hz)
Počet fází	m	[-]	
Skupina zapojení	D, Y, d, y	[-]	
Jmenovité ztráty naprázdno	P_{on}	[W]	
Jmenovité ztráty nakrátko	P_{kn}	[W]	
Jmenovité napětí nakrátko	u_{kn}	[%]	
Dovolená hodnota oteplení vinutí	$\Delta\vartheta_d$	[K]	
Způsob chlazení	AN (přirozený), AF (nucený)	[-]	
Nejvyšší provozní napětí	U_m	[V]	
Izolační hladiny – střídavé napětí	AC	[V]	
Izolační hladiny – impulsní napětí	LI	[V]	
Hladina hluku, akustický výkon	LWA	[dB(A)]	

Při znalosti těchto parametrů se může pokračovat návrhem transformátoru. Základním zdrojem pro kompletní postup návrhu v této bakalářské práci je [19]. Dále jsou na Obr. 4-1 a Obr. 4-2 znázorněny některé důležité parametry, které jsou v návrhu uváděny.



LEGENDA:

- jádro
- vodivý materiál vinutí
- vnější izolace vinutí 1 (NN)
- vnější izolace vinutí 2 (VN)

D_j - průměr kružnice opsané paketům plechu jádra

$D_{w1,in,m}$ - vnitřní mechanický průměr vinutí 1

$D_{w1,in,e}$ - vnitřní elektrický průměr vinutí 1

$D_{w1,ex,e}$ - vnější elektrický průměr vinutí 1

$D_{w1,ex,m}$ - vnější mechanický průměr vinutí 1

$D_{w2,in,m}$ - vnitřní mechanický průměr vinutí 2

$D_{w2,in,e}$ - vnitřní elektrický průměr vinutí 2

$D_{w2,ex,e}$ - vnější elektrický průměr vinutí 2

$D_{w2,ex,m}$ - vnější mechanický průměr vinutí 2

$B_{w1,e}$ - elektrická šířka vinutí 1

$B_{w1,m}$ - mechanická šířka vinutí 1

$B_{w2,e}$ - elektrická šířka vinutí 2

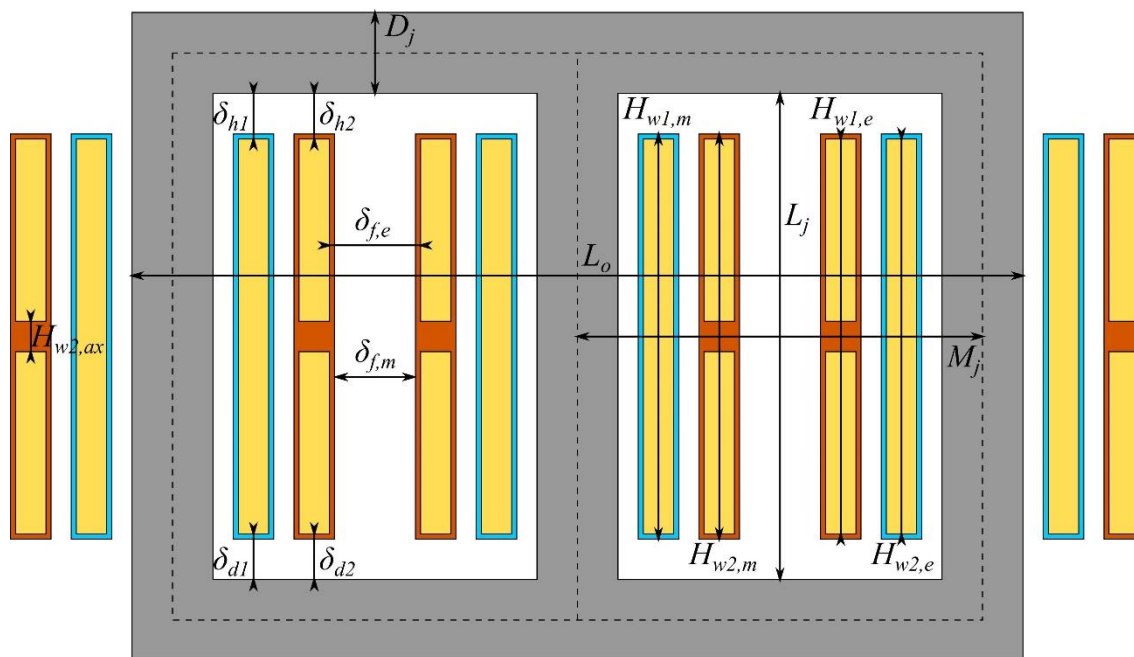
$B_{w2,m}$ - mechanická šířka vinutí 2

δ_{j-1} - minimální elektrická vzdálenost mezi jádrem a vnitřním vinutím 1

$\delta_{1-2,e}$ - minimální elektrická vzdálenost mezi vinutími 1 a 2

$\delta_{1-2,m}$ - minimální mechanická vzdálenost mezi vinutími 1 a 2

Obr. 4-1 Příčný řez dvěma fázemi transformátoru s popisky parametrů



LEGENDA:

■ - magnetický obvod

■ - vodivý materiál vinutí

■ - vnější izolace vinutí 1 (NN)

■ - vnější izolace vinutí 2 (VN)

$H_{w1,e}$ - elektrická výška vinutí 1

$H_{w1,m}$ - mechanická výška vinutí 1

$H_{w2,e}$ - elektrická výška vinutí 2

$H_{w2,m}$ - mechanická výška vinutí 2

δ_{h1} - minimální elektrická vzdálenost horního konce vinutí 1 od jádra

δ_{d1} - minimální elektrická vzdálenost dolního konce vinutí 1 od jádra

δ_{h2} - minimální elektrická vzdálenost horního konce vinutí 2 od jádra

δ_{d2} - minimální elektrická vzdálenost dolního konce vinutí 2 od jádra

$\delta_{f,e}$ - minimální elektrická vzdálenost mezi vinutími 2 vedlejších fází

$\delta_{f,m}$ - minimální mechanická vzdálenost mezi vinutími 2 vedlejších fází

L_j - výška okna magnetického obvodu

M_j - vzdálenost mezi osami jader

L_o - délka magnetického obvodu

D_j - průměr kružnice opsané paketům plechu jádra

Obr. 4-2 Podélný řez celým transformátorem s popisem parametrů

4.1. Výpočet jmenovitých fázových napětí a proudů v přípojnicích a ve vinutích

Velikost jmenovitého fázového napětí U_{nf} se vypočítá z velikosti jmenovitého sdruženého napětí U_{ns} a z počtu fází m . Pokud se jedná o zapojení do hvězdy (Y, y) je toto fázové napětí rovno napětí na vinutí. Pokud se jedná o zapojení do trojúhelníka (D, d) na vinutí je napětí sdružené.

Pro vinutí NN se vypočítá velikost jmenovitého fázového napětí U_{nfl} :

$$U_{nf1} = \frac{U_{ns1}}{\sqrt{m}} \quad (4.1)$$

A pro vinutí VN platí obdobně:

$$U_{nf2} = \frac{U_{ns2}}{\sqrt{m}} \quad (4.2)$$

Jmenovité proudy I_{np1} a I_{np2} tekoucí v přípojnicích vypočteme ze jmenovitého sdruženého výkonu S_n , jmenovitých sdružených napětí U_{ns} a počtu fází m , jak je uvedeno v normě [17]:

$$I_{np1} = \frac{S_n}{U_{ns1} \cdot \sqrt{m}}, I_{np2} = \frac{S_n}{U_{ns2} \cdot \sqrt{m}} \quad (4.3)$$

Při zapojení vinutí do trojúhelníku (D, d) se jmenovitý proud tekoucí jedním vinutím I_{nv} vypočítá ze jmenovitého proudu v přípojnici I_{np} a počtu fází m :

$$I_{ns1} = \frac{I_{nf1}}{\sqrt{m}}, I_{ns2} = \frac{I_{nf2}}{\sqrt{m}} \quad (4.4)$$

Při zapojení vinutí do hvězdy (Y, y) je jmenovitý proud ve vinutí I_{nv} stejný jako v přípojnici I_{np} :

$$I_{nv1} = I_{np1}, I_{nv2} = I_{np2} \quad (4.5)$$

4.2. Volba parametrů průřezu magnetického obvodu

Nejčastější druh magnetického obvodu je pro počet fází $m = 3$ tří jádrový magnetický obvod.

Velikost koeficientu plnění magnetického obvodu $k_{p,Fe}$, který dosahuje obvykle hodnot 0,8 až 0,94 se může odhadnout podle parametrů podobného transformátoru, nebo se dá vypočítat, ale nejpřesnější a nejpoužívanější je vyjít ze znalostí existujícího transformátoru.

Pro volbu velikosti kružnice opsané D_j průřezu jádra magnetického obvodu se může využít empirická formule pro výpočet doporučené velikosti kružnice opsané $D_{j,dop}$ vycházející z velikosti jmenovitého výkonu S_n . Pro kmitočet $f_n = 50$ Hz platí:

$$D_{j,dop} = \sqrt{\frac{S_n}{17}} [mm] \quad (4.6)$$

Ovšem nejspolehlivější je opět volit D_j podle nejvíce podobného transformátoru, který již byl vyroben.

4.3. Výpočet průřezu magnetického obvodu

Čistý průřez jádra magnetického obvodu S_j se vypočítá z průměru D_j :

$$S_j = \frac{\pi \cdot D_j^2 \cdot k_{p,Fe}}{4} \quad (4.7)$$

Dále se při detailním návrhu volí:

- Tloušťka plechů T_{plech}
- Počet stupňů odstupňovaného průřezu n_{stup}
- Velikost stupňů H_{stup}

4.4. Návrh hodnoty magnetické indukce v jádře

Magnetická indukce v jádře B_j se volí v rozmezí 1,00 – 1,75 T v závislosti na:

- Požadovaných ztrátách naprázdno P_o (musí splňovat podmínky podle Směrnice 2009/125/ES, takový návrh se nazývá Eco-design)
- Jakosti použitých transformátorových plechů p_o (uváděno ve W/kg)
- Způsobu skládání plechů v jádře (v této práci metoda Step-lap)
- Velikosti jmenovité frekvence f_n (zde uvažujeme vždy 50 Hz)
- Předpokládaném druhu plechů

4.5. Výpočet počtu závitů

V prvním kroku navrhne počet závitů na straně vinutí 1 (nižšího napětí) N_{z1} při uvažování zapojení tohoto vinutí do hvězdy. Podle indukčního zákona se počet závitů vypočte ze jmenovitého fázového napětí U_{nf1} , průřezu magnetického obvodu S_j , jmenovité magnetické indukce B_j v jádře a jmenovité frekvence f_n :

$$N_{z1} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{nf1}}{2\pi \cdot B_j \cdot S_j \cdot f_n} \quad (4.8)$$

Z praktických důvodů se N_{z1} zaokrouhluje na celé číslo

Jmenovitý počet závitů $N_{z2,n}$ na straně vinutí 2 (VN) se vypočítá ze jmenovitého převodu transformátoru a počtu závitů N_{z1} , při zapojení VN vinutí do trojúhelníka platí:

$$N_{z2,n} = \frac{U_{ns2}}{U_{nf1}} \cdot N_{z1} \quad (4.9)$$

Celkový počet závitů $N_{z2,cel}$ vinutí 2 se vypočítá ze jmenovitého počtu závitů $N_{z2,n}$ a rozsahu plusových odboček $ro = 2 \cdot 2,5 \% = 5 \%$ (celkem 5 odboček, 2 plusové, 1 jmenovitá a 2 minusové):

$$N_{z2,cel} = N_{z2,n} \cdot \frac{100 + ro}{100} \quad (4.10)$$

Následně se vypočítá přesná hodnota magnetické indukce jádra B_j :

$$B_j = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{nf1}}{2\pi \cdot N_{z1} \cdot S_j \cdot f_n} \quad (4.11)$$

4.6. Volba základních parametrů, rozměrů a průřezů vinutí

V tomto kroku navrhne strukturu vinutí 1 a 2, zvolíme druh materiálu vodiče (hliník nebo měď), podle druhu materiálu vodičů a druhu vinutí volíme přibližnou návrhovou velikost proudové hustoty σ_1 a σ_2 ve vinutí 1, respektive 2. Při volbě velikosti proudové hustoty hrají významnou roli případné axiální chladicí kanály.

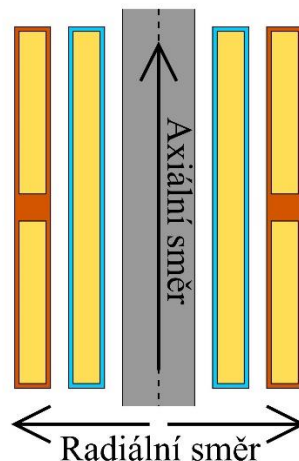
Z důvodu požadovaných poměrně nízkých ztrát nakrátko P_{kn} v rámci „Eko-designu“ se volí při počátečním návrhu hodnoty proudových hustot nízké:

- Pro hliník $\sigma_{Al} = 1,0 - 1,5 \text{ A/mm}^2$
- Pro měď $\sigma_{Cu} = 1,5 - 2,0 \text{ A/mm}^2$

Při použití axiálních chladicích kanálů ve vinutí se volí hodnoty proudových hustot σ_{Al} a σ_{Cu} vyšší v závislosti na počtu $n_{\delta 1}$, $n_{\delta 2}$ a šířce δ_1 , δ_2 axiálních chladicích kanálů ve vinutích a axiální výšce vinutí H_w .

Neexistuje žádná jednoduchá formule pro počáteční volbu hodnoty proudové hustoty, vždy je třeba zkontrolovat, zda pro zvolené proudové hustoty po případných korekcích vzhledem k možným rozměrům vyráběných vodičů jsou dodrženy hodnoty požadovaných ztrát nakrátko P_{kn} a zároveň nejsou překročeny hodnoty dovolených oteplení $\Delta\theta_1$ a $\Delta\theta_2$ ve vinutích 1 a 2.

Při návrhu vinutí je používáno názvosloví axiální a radiální směr, jejich význam je zobrazený na Obr. 4-3.



Obr. 4-3 Podélný řez jednou fází transformátoru

4.6.1 Vinutí 1 (NN)

Vinutí na straně nižšího napětí má zpravidla hodnotu jmenovitého napětí U_{sn1} cca 400 V. Proto vychází poměrně nízký počet závitů N_{z1} a velký jmenovitý proud I_{fn1} . Pro taková vinutí je vhodné použít fóliového vinutí.

U fóliového vinutí má vodič stejnou výšku $h_{v1,e}$ jako je axiální elektrická výška $H_{w1,e}$ celého vinutí 1. Předběžný průřez vinutí 1 S_{w1} se vypočítá z hodnoty jmenovitého proudu ve vinutí I_{nv1} a zvolené proudové hustoty σ_1 :

$$S_{w1} = \frac{I_{nv1}}{\sigma_1} \quad (4.12)$$

U fóliových vinutí se nepoužívá paralelního vodiče, takže průřez vinutí S_{w1} je shodný s průřezem vodiče S_{v1} :

$$S_{v1} = S_{w1} \quad (4.13)$$

Šířku fóliového vinutí b_{v1} (v radiálním směru) určíme z velikosti průřezu vodiče S_{v1} a výšky vodiče h_{w1} , tedy výšky vinutí 1 ($h_{v1} = H_{w1,e}$):

$$b_{v1} = \frac{S_{w1}}{H_{w1,e}} \quad (4.14)$$

Protože rozměry vodiče (šířka a tloušťka fólie) se vyrábí pouze v určité číselné řadě, je vhodné vybrat nejbližší reálné rozměry. Zvolením konkrétních rozměrů fóliového vodiče h_{v1} a b_{v1} je zvolená i elektrická výška $H_{w1,e}$ vinutí 1.

Mezi závitů fóliového vinutí se navíjí mezizávitová izolace o tloušťce b_{i1} . Axiální závitová výška $H_{w1,m}$ se volí vyšší nežli elektrická výška $H_{w1,e}$, aby na obou koncích vinutí 1 vznikl dostatečný přesah izolace h_{i1} , který odolá v provozu i při zkouškách povrchovým přeskokům napětí, výška izolace zároveň tvoří mechanickou axiální výšku vinutí 1. Přesah izolace na jednom konci vinutí se vypočítá podle (4.15):

$$h_{i1} = \frac{H_{w1,m} - H_{w1,e}}{2} \quad (4.15)$$

Mechanický radiální rozměr (šířka) $B_{w1,m}$ vinutí 1 se vypočítá jako součin počtu závitů ve vinutí a součtu radiálních rozměrů vodiče b_{v1} a mezizávitové izolace b_{i1} :

$$B_{w1,m} = N_{z1} \cdot (b_{v1} + b_{i1}) \quad (4.16)$$

V případě, že z důvodů chlazení je nutné do vinutí 1 umístit $n_{\delta 1}$ axiálních chladicích kanálů o šířce δ_1 , vypočítá se mechanický radiální rozměr fóliového vinutí 1 následovně:

$$B_{w1,m} = N_{z1} \cdot (b_{v1} + b_{i1}) + n_{\delta 1} \cdot \delta_1 \quad (4.17)$$

Vypočtená mechanická šířka $B_{w1,m}$ se zpravidla zaokrouhluje na celé milimetry nahoru, případně se jinak koriguje podle hodnot změřených na podobných reálných transformátorech ve výrobě.

Elektrický radiální rozměr $B_{w1,e}$ fóliového vinutí 1 se stanoví zmenšením mechanického radiálního rozměru $B_{w1,m}$ o šířku izolace na vnitřním průměru $b_{i1,in}$ a vnějším průměru $b_{i1,ex}$:

$$B_{w1,e} = B_{w1,m} - b_{i1,in} - b_{i1,ex} \quad (4.18)$$

4.6.2 Vinutí 2 (VN)

Vinutí vyššího napětí má zpravidla hodnoty jmenovitého napětí U_{ns2} 6, 10, 15, 22 nebo 36 kV. Proto se vinutí vzduchových (suchých) transformátorů těchto napětí zpravidla zalévají do izolační pryskyřice. Vzhledem k napětí je vhodné zvolit takový druh vinutí, který lze vyrobit i pro velký počet závitů menšího průřezu. Mezi tyto typy vinutí se řadí plynulé (dvojdeskové), kotoučové (deskové) nebo sypané (padané nebo také gravity-line).

U vinutí 2 bývá požadavek na výrobu s odbočkami podle normy [18], a tak je třeba navrhnout vinutí tak, aby bylo možné jednoduše vyvést vývody na vnější povrch vinutí

2. Přitom je třeba zajistit dostatečnou elektrickou pevnost mezi vývody odboček navzájem a vůči ostatním závitům vinutí v neodbočkové části.

4.6.2.1 Plynulé vinutí

Pro plynulé vinutí se používají profilové vodiče obdélníkového průřezu o výšce holého vodiče $h_{v2,e}$ a šířce $b_{v2,e}$ s poloměrem zaoblení hran vodiče $r_{v2,e}$. Vodič má lakovou izolaci s oboustranným izolačním přírůstkem i_{v2} .

Předběžný průřez vinutí profilového vodiče vypočítáme z hodnoty jmenovitého proudu ve vinutí I_{np2} a zvolené proudové hustoty σ_2 :

$$S_{w2} = \frac{I_{nv2}}{\sigma_2} \quad (4.19)$$

Průřez profilového vodiče se vypočítá z rozměrů $h_{v2,e}$, $b_{v2,e}$ a poloměru zaoblení na hraně $r_{v2,e}$:

$$S_{v2} = h_{v2,e} \cdot b_{v2,e} - (4 - \pi) \cdot r_{v2,e}^2 \quad (4.20)$$

Rozměry dostupného vodiče $h_{v2,e}$, $b_{v2,e}$ se volí tak, aby byl průřez vodiče S_{v2} co nejbližší průřezu vinutí S_{w2} .

Mechanické rozměry $h_{v2,m}$, $b_{v2,m}$ profilového vodiče se vypočítají z rozměrů holého vodiče $h_{v2,e}$, $b_{v2,e}$ zvětšené o oboustranný izolační přírůstek i_{v2} :

$$h_{v2,m} = h_{v2,e} + i_{v2} \quad (4.21)$$

$$b_{v2,m} = b_{v2,e} + i_{v2} \quad (4.22)$$

Vzhledem k požadavku, aby oba vývody z odbočky byly na vnějším průměru vinutí 2, je vhodné položit celý rozsah jednoho stupně odbočky (zpravidla 2,5 % jmenovitého napětí, celkový rozsah je pak ± 5 %) na jednu dvojdesku.

Počet závitů v jedné desce odbočkové části $N_{z2,od}$ se vypočítá ze jmenovitého počtu závitů $N_{z2,n}$ vinutí 2 vynásobeným rozsahem odboček ro a ty jsou následně podělené dvěma, protože plusové (i minusové) odbočky mají dva stupně, které jsou vyvedeny. Dále je rozsah ro podělený znova dvěma, aby byl vypočítán počet závitů v jedné desce dvojdesky. A jelikož je ro uváděno v procentech, musí být poděleno ještě sty:

$$N_{z2,od} = N_{z2,n} \cdot \frac{ro}{2 \cdot 2 \cdot 100} \quad (4.23)$$

Díky dvou plusovým a dvou minusovým odbočkám má celá odbočková část 8 desek. Protože chceme celé vinutí navinout pouze jedním rozměrem vodiče, je vhodné, aby desky v neodbočkové části měly přibližně stejný počet závitů jako desky v části odbočkové. Z tohoto předpokladu a znalosti celkového počtu závitů $N_{z2,cel}$ můžeme vypočítat počet desek v neodbočkové části $n_{d2,neod}$:

$$n_{d2,neod} = \frac{N_{z2,cel} - 8 \cdot N_{z2,od}}{N_{z2,od}} \quad (4.24)$$

Aby vstup a výstup do a z plynulého vinutí 2 a všechny odbočkové dvojdesky měly vývody na vnějším průměru, musí být počet $n_{d2,cel}$ desek plynulého vinutí sudý, proto počet desek v neodbočkové části $n_{d2,neod}$ zaokrouhlíme na nejbližší celé sudé číslo. Celkový počet desek vinutí 2 $n_{d2,cel}$ je pak součtem neodbočkových desek $n_{d2,neod}$ s osmi deskami v odbočkové části:

$$n_{d2,cel} = n_{d2,neod} + 8 \quad (4.25)$$

Dále je nutné zkontrolovat převod napětí na všech odbočkách, podle [17] je tolerance 0,5 % stanoveného převodu. Počet závitů na k -té odbočce se vypočítá:

$$N_{z2,k} = N_{z2,cel} - 2k \cdot N_{z2,od} \quad (4.26)$$

Kde k má hodnotu 0, 1, 2, 3 nebo 4, podle zvolené odbočky. Pro každou odbočku musí platit tolerance:

$$\left| \frac{U_{sn2}}{U_{fn1}} \cdot (1,050 - k \cdot 0,025) - \frac{N_{z2,k}}{N_{z1}} \right| < 0,005 \quad (4.27)$$

Pokud není splněna přesnost převodu na všech odbočkách, musí se upravit počet závitů $N_{z2,od}$ v odbočkových deskách, případně nemusí být stejný počet závitů ve všech odbočkových dvojdeskách.

Jakmile je vyřešený správný počet závitů v odbočkové části plynulého vinutí, stanovíme počet závitů v neredukovaných deskách neodbočkové části $N_{z2,pln}$:

$$N_{z2,pln} = \frac{N_{z2,cel} - 8 \cdot N_{z2,od}}{n_{d2,neod}} \quad (4.28)$$

Počet závitů $N_{z2,pln}$ se zaokrouhlí nahoru na celé číslo.

Následně určíme počet závitů $N_{z2,red}$ v redukovaných deskách neodbočkové části vinutí 2, kde jsou závity $N_{z2,pln}$ o jeden menší než v neredukovaných deskách:

$$N_{z2,red} = N_{z2,pln} - 1 \quad (4.29)$$

Dále platí, že součet desek $n_{d2,red}$ a $n_{d2,pln}$ v neodbočkové části s redukovaným a plným počtem závitů je roven celkovému počtu desek v neodbočkové části $n_{d2,neod}$:

$$n_{d2,red} + n_{d2,pln} = n_{d2,neod} \quad (4.30)$$

Počet závitů v neodbočkové části se vypočítá součtem závitů ve všech redukovaných a plných deskách neodbočkové části. Také se vypočítá odečtením počtu závitů v odbočkové části, tedy osmkrát počet závitů v odbočkové desce $N_{z2,od}$, od celkového počtu závitů $N_{z2,cel}$ vinutí 2:

$$N_{z2,red} \cdot n_{d2,red} + N_{z2,pln} \cdot n_{d2,pln} = N_{z2,cel} - 8 \cdot N_{z2,od} \quad (4.31)$$

Dosazením a úpravou vzorců (4.29), (4.30) a (4.31) získáme vztah pro výpočet počtu desek s neredukovaným počtem závitů $n_{d2,pln}$:

$$n_{d2,pln} = N_{z2,cel} - 8 \cdot N_{z2,od} - N_{z2,red} \cdot n_{d2,neod} \quad (4.32)$$

Pokud vyjde počet desek s redukovaným počtem závitů $N_{z2,red}$ větší než je číslo $2 \cdot N_{z2,pln}$, vyplatí se udělat opravu celkového počtu desek $n_{d2,cel}$. Nový celkový počet desek by měl být opět sudý.

Elektrická výška $H_{w2,e}$ vinutí 2 má být zvolena z důvodů snížení elektrického namáhání na každém konci vinutí 2 mírně menší o velikost f_2 , která závisí na velikosti maximální provozního napětí U_{m2} vinutí 2, než je elektrická výška $H_{w1,e}$ vinutí 1:

$$H_{w2,e} = H_{w1,e} - 2 \cdot f_2 \quad (4.33)$$

Uprostřed výšky vinutí 2 musí být umístěna dostatečně velká axiální mezera $H_{w2,ax}$ která jednak zajistí rezervu, aby se při horším vrstvení dvojdesek plynulého vinutí v axiálním směru i při plus toleranci výšky použitého vodiče $h_{v2,m}$ nebyla překročena

elektrická výška $H_{w2,e}$ vinutí 2. Dále tato mezera $H_{w2,ax}$ musí zajistit dostatečnou elektrickou pevnost mezi volnými konci odboček vinutí 2 při zapojení na mínus krajní odbočku, kdy velikost elektrického napětí mezi mechanicky sousedními vodiči na vnějším průměru vinutí 2 je rovna celému odbočkovému rozsahu (zpravidla $2 \cdot 5 \% = 10\%$) jmenovitého napětí U_{sn2} .

Velikost axiální mezery $H_{w2,ax}$ se volí z náročnějšího požadavku.

Mechanická výška vodiče $h_{v2,m}$ se vypočítá z elektrické výšky $H_{w2,e}$ vinutí 2 zmenšené o výšku axiální mezery $H_{w2,ax}$ podělením celkového počtu desek $n_{d2,cel}$:

$$h_{v2,m} = \frac{H_{w2,e} - H_{w2,ax}}{n_{d2,cel}} \quad (4.34)$$

Elektrická výška vodiče $h_{v2,e}$ se vypočítá upravením vztahu (4.21), tedy odečtením oboustranného přírůstku izolace i_{v2} :

$$h_{v2,e} = h_{v2,m} - i_{v2} \quad (4.35)$$

Šířka holého vodiče $b_{v2,e}$ se stanoví z požadovaného průřezu vodiče S_{v2} , vypočítané elektrické výšky vodiče $h_{v2,e}$ a poloměru zaoblení $r_{v2,e}$:

$$b_{v2,e} = \frac{S_{v2} + (4 - \pi) \cdot r_{v2,e}^2}{h_{v2,e}} \quad (4.36)$$

Mechanická šířka vodiče $b_{v2,m}$ se vypočítá ze vztahu výše (4.22).

Podle možností dodavatelů vodiče nebo skladu výrobce zvolíme vodič s rozměry $h_{v2,e}$, $b_{v2,e}$ a $r_{v2,e}$ nejbližšími vypočteným hodnotám v předchozích krocích.

Výsledný průřez S_{v2} profilového vodiče se vypočítá podle vztahu (4.20).

Když jsou počty desek a závitů v deskách definitivní a známe rozměry reálného vodiče, provedeme výpočet elektrického napětí U_{md2} v nejkritičtějších místě mezi sousedními deskami vinutí 2 a zkontrolujeme velikost elektrického namáhání E_i mezizávitové izolace vodiče i_{v2} v tomto místě:

$$U_{md2} = \frac{U_{sn2}}{N_{z2,cel} - 8 \cdot N_{z2,od}} \cdot (2 \cdot N_{z2,pln} - 1) \quad (4.37)$$

Napětí U_{md2} v nejkritičtějších místě mezi sousedními deskami by nemělo pro vinutí s lakovou izolací s oboustrannou tloušťkou $i_{v2} = 0,16$ mm přesáhnout 600 V.

Obecně se intenzita elektrického pole namáhání izolace vodiče v tomto kritickém místě vypočítá podle vztahu:

$$E_i = \frac{U_{md2}}{i_{v2}} \quad (4.38)$$

Pokud je kontrola elektrického namáhání mezizávitové izolace v pořádku, pokračujeme výpočtem elektrických a mechanických rozměrů, výšky, šířky a průřezů vinutí 2.

Elektrická šířka $B_{w2,e}$ vinutí 2 se stanoví z šířky desky s plným počtem závitů $N_{z2,pln}$ o mechanické šířce $b_{v2,m}$:

$$B_{w2,e} = N_{z2,pln} \cdot b_{v2,m} \quad (4.39)$$

Pro korigování neideálního dotažení vodičů k sobě v radiálním směru může docházet k nárůstu šířky vinutí, proto se neodčítá jedna tloušťka oboustranného přírůstku izolace i_{v2} a elektrická šířka $B_{w2,e}$ vinutí 2 se zaokrouhluje na celé mm nahoru.

Mechanická výška $H_{w2,m}$ vinutí 2 se vypočítá ze skutečné elektrické výšky $H_{w2,e}$ vinutí 2 a izolačních přírůstků $h_{i2,h}$ a $h_{i2,d}$ na koncích vinutí v axiálním směru. Velikost izolačních přírůstků $h_{i2,h}$ a $h_{i2,d}$ se stanovuje v závislosti na použité technologii a velikosti zkušebních napětí vinutí 2:

$$H_{w2,m} = H_{w2,e} + h_{i2,h} + h_{i2,d} \quad (4.40)$$

Mechanická šířka $B_{w2,m}$ se stanoví ze skutečné elektrické šířky $B_{w2,e}$ vinutí 2 a tlouštěk vnějších izolací $b_{i2,in}$ a $b_{i2,ex}$ na vnitřním a vnějším průměru:

$$B_{w2,m} = B_{w2,e} + b_{i2,in} + b_{i2,ex} \quad (4.41)$$

4.6.2.2 Sypané vinutí

Průřez sypaného vinutí 2 S_{w2} je roven průřezu vodiče S_{v2} , protože u sypaného vinutí se nepoužívá paralelního vodiče. Průřez se vypočítá ze jmenovitého proudu I_{nv2} jdoucího vinutím a proudové hustoty σ_2 ve vinutí 2:

$$S_{w2} = S_{v2} = \frac{I_{nv2}}{\sigma_2} \quad (4.42)$$

Při návrhu sypaného vinutí 2 se používají izolované vodiče kruhového průřezu o průměru holého vodiče $d_{v2,e}$, který se vypočítá z průřezu vinutí S_{w2} :

$$d_{v2,e} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{w2}}{\pi}} \quad (4.43)$$

Vodič má lakovou izolaci oboustranné tloušťky i_{v2} , kterou je zajištěna mezizávitová elektrická pevnost mezi dvěma mechanicky sousedními závitů. Mechanický průměr vodiče $d_{v2,m}$ se vypočítá:

$$d_{v2,m} = d_{v2,e} + i_{v2} \quad (4.44)$$

Vzhledem k technologii navíjení není radiální ani axiální poloha vodiče přesně určena, proto napětí mezi dvěma mechanicky sousedními vodiči může být mnohonásobek jednoho závitového napětí.

Vodič se navíjí z většího elektrického průměru $D_{e2,ex}$ na menší průměr $D_{e2,in}$ a opačným směrem. Začátky a konce celého vinutí 2 a vývody pro odbočky jsou vždy na vnějším průměru.

Pro návrh sypaného vinutí je důležité znát technologický koeficient plnění $k_{p,s}$ definovaný jako podíl součinu průřezu $S_{v2,i}$ izolovaného kruhového vodiče o mechanickém průměru $d_{v2,m}$ násobeného počtem závitů $N_{z2,cel}$, podělený celkovým průřezem oblasti vinutí $S_{w2,H,B}$ ve které leží $N_{z2,cel}$ závitů:

$$S_{v2,i} = \frac{\pi \cdot d_{v2,m}^2}{4} \quad (4.45)$$

$$k_{p,s} = \frac{S_{v2,i} \cdot N_{z2,cel}}{S_{w2,H,B}} \quad (4.46)$$

$$S_{w2,H,B} = H_{w2,m} \cdot B_{w2,m} \quad (4.47)$$

Celkový průřez oblasti vinutí $S_{w2,H,B}$ je definován jako průřez části vinutí o výšce H a šířce B , do které se navine N_z závitů o mechanickém průřezu $S_{v,i}$ vodiče včetně izolace.

Hodnota technologického koeficientu plnění $k_{p,s}$ sypaného vinutí závisí částečně na průměru vodiče d_v . Jeho velikost se pohybuje kolem čísla $k_{p,s} = 0,70$.

Pro malé průměry d_v o velikosti cca 1 mm je plnění $k_{p,s}$ horší, např. 0,68.

Pro průměry větší nežli $d_v = 4,5$ mm rovněž hodnota $k_{p,s}$ klesá pod 0,70.

Elektrická šířka $B_{w2,e}$ sypaného vinutí je omezena maximální šířkou 50 mm bez ohledu na velikost průměru vinutí.

Minimální elektrická šířka $B_{w2,e}$ padaného vinutí závisí na průměru vodiče $d_{v2,m}$, s větším průměrem roste i minimální elektrická šířka. Tyto závislosti jsou uvedeny v tabulkách [19]. Pro nejmenší průměry vodiče je tato šířka 15 mm.

Pro elektrickou výšku $H_{w2,e}$ vinutí 2 platí stejné pravidlo (4.33) jako pro plynulé vinutí.

Axiální rozměr $H_{w2,er}$ prostoru pro navíjení sypaného vinutí se vypočítá z elektrické výšky $H_{w2,e}$ vinutí 2 a velikosti axiální mezery $H_{w2,ax}$ mezi polovinami vinutí.

$$H_{w2,er} = H_{w2,e} - H_{w2,ax} \quad (4.48)$$

Elektrická šířka $B_{w2,e}$ sypaného vinutí se stanoví z vypočtené výšky $H_{w2,er}$ prostoru pro navíjení, celkového počtu závitů $N_{z2,cel}$, mechanického průměru vodiče $d_{v2,m}$ vinutí 2 a znalosti technologického součinitele plnění $k_{p,s}$ sypaného vinutí pro zvolený mechanický průměr $d_{v2,m}$ vodiče.

$$B_{w2,e} = \frac{\pi \cdot d_{v2,m}^2 \cdot N_{z2,cel}}{4 \cdot H_{w2,er} \cdot k_{p,s}} \quad (4.49)$$

Velikost elektrické šířky $B_{w2,e}$ vinutí 2 se zaokrouhluje na celé mm nahoru.

Mechanická výška $H_{w2,m}$ a mechanická šířka $B_{w2,m}$ se dopočítají podle stejných rovnic (4.40) a (4.41) jako pro plynulé vinutí.

Zatím není technologie na výrobu sypaného vinutí s axiálním chladičím kanálem.

Dále se musí určit počet závitů pro každou odbočku. Pro k -tou odbočku platí, že její počet závitů $N_{z2,k}$ je:

$$N_{z2,k} = \frac{N_{z2,cel}}{2} + \left(\frac{k}{2} - 1\right) \cdot (N_{z2,cel} - N_{z2,n}) \quad (4.50)$$

Kde k má hodnotu 0, 1, 2, 3 nebo 4, podle zvolené odbočky a stejně jako pro plynulé vinutí, pro každou odbočku musí platit tolerance do 0,5% požadovaného napětí. Kontrola se provede podle vzorce:

$$\left| 0,950 + k \cdot 0,025 - \frac{N_{z2,cel} - N_{z2,4} + N_{z2,k}}{N_{z2,n}} \right| < 0,005 \quad (4.51)$$

4.6.2.3 Deskové vinutí

Při návrhu deskového vinutí 2 se používají pásové holé vodiče obdélníkového průřezu o výšce holého vodiče $h_{v2,e}$ a šířce $b_{v2,e}$. Vodič nemá žádnou izolaci a mezizávitová izolace je zajištěna izolačním páskem tloušťky b_{i2} navíjeným současně s vodivým páskem mezi dva radiálně sousední závity. Pro suché transformátory se zatím umí navíjet deskové vinutí pouze bez použití více paralelních vodičů.

Předběžný průřez vinutí profilového vodiče vypočítáme z hodnoty jmenovitého proudu ve vinutí I_{nv2} a zvolené proudové hustoty σ_2 :

$$S_{w2} = \frac{I_{nv2}}{\sigma_2} \quad (4.52)$$

Průřez S_{v2} profilového vodiče se vypočítá z rozměrů vodiče $h_{v2,e}$ a $b_{v2,e}$:

$$S_{v2} = h_{v2,e} \cdot b_{v2,e} \quad (4.53)$$

Rozměry vodiče $h_{v2,e}$, $b_{v2,e}$ jsou voleny tak, aby průřez S_{v2} vodiče byl co nejbližší průřezu vinutí S_{w2} .

Mechanická výška $h_{v2,m}$ profilového vodiče je stejná jako elektrická výška $h_{v2,e}$, protože vodič nemá lakovou izolaci. U výpočtu mechanické šířky vodiče už musíme uvažovat izolační přírůstek b_{i2} :

$$h_{v2,m} = h_{v2,e} \quad (4.54)$$

$$b_{v2,m} = b_{v2,e} + b_{i2} \quad (4.55)$$

Protože jedna deska deskového vinutí má jeden konec na vnějším průměru a druhý konec na vnitřním průměru, musí být při výrobě vnitřní vývody propojeny na plocho orientovanou spojkou na vnější průměr následující desky vinutí. Dimenzování propojovací spojky se většinou volí stejné jako je dimenzování vodiče v deskách vinutí.

Aby byla zajištěna elektrická pevnost mezi propojovací spojkou a deskami vinutí, mezi který prochází, musí být mezi sousedními deskami minimální mezera, jejíž axiální výška $h_{2,sp}$ se rovná tloušťce holé propojovací spojky $t_{2,sp} = b_{v2,e}$ plus tloušťka axiální izolace $i_{2,ax}$ dimenzovaná na elektrické napětí jedné desky deskového vinutí:

$$h_{2,sp} = b_{v2,e} + i_{2,ax} \quad (4.56)$$

Protože potřebujeme, aby vývody odboček byly na vnějším průměru vinutí, je vhodné, aby rozsah odbočky ležel na jedné desce. Počet závitů v jedné desce odbočkové části $N_{z2,od}$ se vypočítá ze jmenovitého počtu závitů a rozsahu odboček:

$$N_{z2,od} = N_{z2,n} \cdot \frac{r_o}{2 \cdot 100} \quad (4.57)$$

Celá odbočková část se skládá ze 4 desek. Protože chceme celé vinutí navinout pouze jedním rozměrem vodiče, počet desek v neodbočkové části $n_{d2,neod}$ vypočítáme podobně jako pro plynulé vinutí (4.24):

$$n_{d2,neod} = \frac{N_{z2,cel} - 4 \cdot N_{z2,od}}{N_{z2,od}} \quad (4.58)$$

Počet desek se zaokrouhlí na celé číslo. Na rozdíl od plynulého může být počet desek lichý. Celkový počet desek vinutí 2 $n_{d2,cel}$ je pak součtem neodbočkových desek $n_{d2,neod}$ se čtyřmi deskami v odbočkové části:

$$n_{d2,cel} = n_{d2,neod} + 4 \quad (4.59)$$

Dále je nutné zkontrolovat převod napětí na všech odbočkách, podle [17] je tolerance 0,5 % stanoveného převodu. Počet závitů na k -té odbočce se vypočítá:

$$N_{z2,k} = N_{z2,cel} - k \cdot N_{z2,od} \quad (4.60)$$

Kde k má hodnotu 0, 1, 2, 3 nebo 4, podle zvolené odbočky. Pro každou odbočku musí platit (4.27).

Následně se postupuje jako pro plynulé vinutí. Stanovíme počet závitů v neredukovaných deskách neodbočkové části $N_{z2,pln}$:

$$N_{z2,pln} = \frac{N_{z2,cel} - 4 \cdot N_{z2,od}}{n_{d2,neod}} \quad (4.61)$$

Počet závitů $N_{z2,pln}$ se zaokrouhlí nahoru.

Následně určíme počet závitů $N_{z2,red}$ v redukovaných deskách neodbočkové části vinutí 2, kde jsou závity $N_{z2,pln}$ o jeden menší než v neredukovaných deskách:

$$N_{z2,red} = N_{z2,pln} - 1 \quad (4.62)$$

Dále platí, že součet desek $n_{d2,red}$ a $n_{d2,pln}$ v neodbočkové části s redukovaným a plným počtem závitů je roven celkovému počtu desek v neodbočkové části $n_{d2,neod}$:

$$n_{d2,red} + n_{d2,pln} = n_{d2,neod} \quad (4.63)$$

Počet závitů v neodbočkové části se vypočítá součtem závitů ve všech redukovaných a plných deskách neodbočkové části. Také se vypočítá odečtením počtu závitů v odbočkové části, tedy osmkrát počet závitů v odbočkové desce $N_{z2,od}$, od celkového počtu závitů $N_{z2,cel}$ vinutí 2:

$$N_{z2,red} \cdot n_{d2,red} + N_{z2,pln} \cdot n_{d2,pln} = N_{z2,cel} - 8 \cdot N_{z2,od} \quad (4.64)$$

Úpravou vzorce pro plynulé vinutí (4.65) dostaneme rovnici pro vztah pro výpočet počtu desek s neredukovaným počtem závitů $n_{d2,pln}$:

$$n_{d2,pln} = N_{z2,cel} - 4 \cdot N_{z2,od} - N_{z2,red} \cdot n_{d2,neod} \quad (4.65)$$

Počet desek s redukovaným počtem závitů $N_{z2,red}$ se vypočítá:

$$n_{d2,red} = n_{d2,neod} - n_{d2,pln} \quad (4.66)$$

Pokud vyjde počet desek s redukovaným počtem $N_{z2,red}$ větší než je číslo $2 \cdot N_{z2,pln}$, vyplátí se udělat opravu celkového počtu desek $n_{d2,cel}$.

Pro výpočet elektrické výšky $H_{w2,e}$ platí (4.33). Dále se volí velikost axiální mezery $H_{w2,ax}$ v polovině vinutí 2 stejně jako pro plynulé vinutí.

Mechanická výška $h_{v2,dm}$ připadající na axiální výšku jedné desky, která v sobě zahrnuje výšku holého pásu $h_{v2,e}$, axiální výšku jedné propojky o tloušťce $t_{2,sp}$ a minimální elektrickou mezeru $i_{2,ax}$ mezi propojkou a sousední deskou se vypočítá z elektrické výšky $H_{w2,e}$ vinutí 2 zmenšené o výšku středové axiální mezery $H_{w2,ax}$ a celkového počtu desek $n_{d2,cel}$:

$$h_{v2,dm} = \frac{H_{w2,e} - H_{w2,ax}}{n_{d2,cel}} \quad (4.67)$$

Elektrická výška vodiče $h_{v2,e}$ se získá z mechanické výšky desky $h_{v2,dm}$ odečtením axiální výšky jedné propojky o tloušťce $t_{2,sp}$ a minimální elektrické mezery $i_{2,ax}$ odečtením oboustranného přírůstku izolace mezi propojkou a sousední deskou:

$$h_{v2,e} = h_{v2,dm} - t_{2,sp} - i_{2,ax} \quad (4.68)$$

Šířka holého vodiče $b_{v2,e}$ se stanoví z požadovaného průřezu vodiče S_{w2} , vypočítané elektrické výšky vodiče $h_{v2,e}$:

$$b_{v2,e} = \frac{S_{w2}}{h_{v2,e}} \quad (4.69)$$

Podle možností dodavatelů vodiče zvolíme vodič s rozměry $h_{v2,e}$, $b_{v2,e}$ nejbližšími vypočteným hodnotám v předchozích krocích. Z těchto rozměrů se vypočítá skutečný průřez vodiče S_{v2} podle vztahu (4.53).

Když jsou počty desek a závitů v deskách definitivní a známe rozměry reálného vodiče, provedeme výpočet elektrického napětí U_{md2} v nejkritičtějším místě mezi deskou a sousední propojkou vinutí 2 a zkontrolujeme velikost elektrického namáhání E_i izolace o tloušťce $i_{2,ax}$ v tomto místě:

$$U_{md2} = \frac{U_{sn2}}{N_{z2,cel} - 4 \cdot N_{z2,od}} \cdot N_{z2,pln} \quad (4.70)$$

Napětí U_{md2} v místě mezi deskou a sousední propojkou vinutí 2 by nemělo překročit hodnotu dovoleného napětí $U_{md2,d}$ pro mezeru i_{ax2} . Intenzita elektrického namáhání izolace vodiče činí:

$$E_i = \frac{U_{md2}}{i_{2,ax}} \quad (4.71)$$

Pokud je kontrola elektrického namáhání mezi deskou a sousední propojkou vinutí 2 v pořádku, pokračujeme výpočtem elektrických a mechanických rozměrů vinutí 2.

Elektrická šířka $B_{w2,e}$ deskového vinutí 2 se stanoví z šířky desky s plným počtem závitů $N_{z2,pln}$ o mechanické šířce vodiče $b_{v2,m}$:

$$B_{w2,e} = N_{z2,cel} \cdot b_{v2,m} \quad (4.72)$$

Teoreticky by se při stanovení elektrické šířky vinutí $B_{w2,e}$ měla odečíst z vypočteného rozměru jedna tloušťka b_{i2} izolačního pásku mezi sousedními závity, ale většinou se velikost elektrické šířky $B_{w2,e}$ vinutí 2 zaokrouhluje na celé mm nahoru.

Mechanická šířka $B_{w2,m}$ a mechanická výška $H_{w2,m}$ vinutí 2 se vypočítá stejně jako pro plynulé vinutí podle vztahů (4.40) a (4.41).

4.7. Určení elektrických a mechanických průměrů vinutí

Průměry vinutí se stanoví z elektrických a mechanických radiálních rozměrů obou vinutí, zvolených vzdáleností δ_{j-1} mezi jádrem a vinutím 1, δ_{1-2} mezi vinutím 1 a 2 a také vzdáleností δ_f mezi vinutími 2 různých fází.

Mechanická vzdálenost δ_{j-1} mezi jádrem a vinutím 1 se volí na základě minimální elektrické vzdálenosti podle tabulek v [19]. Pro výpočet mechanické vzdálenosti δ_{j-1} by se teoreticky měla odečíst od elektrické vzdálenosti mezi jádrem a vinutím 1 tloušťka izolace $b_{i1,in}$ na vnitřní straně vinutí 1, ale jelikož se vzdálenost δ_{j-1} zaokrouhluje na celé mm nahoru a tloušťka izolace $b_{i1,in}$ má malou hodnotu, je odečtení zbytečné. Velikost vzdálenosti δ_{j-1} závisí především na maximálním provozním napětí U_{m1} a zkušebních napětích AC_1 a LI_1 . Vzdálenost se může zvětšit, například pokud nevyjde výpočet

kontroly oteplení. Další příčinou zvětšení δ_{j-1} může být umístění vývodu z vinutí 1 na vnitřním průměru tohoto vinutí.

Mechanický vnitřní průměr $D_{w1,in,m}$ se vypočítá z velikosti průměru jádra D_j a vzdáleností δ_{j-1} mezi jádrem a vinutím 1:

$$D_{w1,in,m} = D_j + 2 \cdot \delta_{j-1} \quad (4.73)$$

Elektrický vnitřní průměr $D_{w1,in,e}$ vinutí 1 je:

$$D_{w1,in,e} = D_{w1,in,m} + 2 \cdot b_{i1,in} \quad (4.74)$$

Mechanický vnější průměr $D_{w1,ex,m}$ je potom:

$$D_{w1,ex,m} = D_{w1,in,m} + 2 \cdot B_{w1,m} \quad (4.75)$$

Elektrický vnější průměr $D_{w1,ex,e}$ vinutí 1:

$$D_{w1,ex,e} = D_{w1,ex,m} - 2 \cdot b_{i1,ex} \quad (4.76)$$

V případě, že vnitřní vinutí 1 je foliové vinutí, předpokládáme že:

$$b_{i1,in} = b_{i1,ex} = b_{i1} \quad (4.77)$$

Pro volbu mechanické vzdálenosti $\delta_{1-2,m}$ mezi vinutími se vychází opět z minimální hodnoty elektrické vzdálenosti $\delta_{1-2,e}$ v tabulkách. Velikost vzdálenosti $\delta_{1-2,e}$ závisí především na maximálním provozním napětí U_{m2} a zkušebních napětí AC_2 a LI_2 vinutí 2.

V případě, že nevychází kontrola oteplení vinutí 1 nebo vinutí 2, může se tento problém vyřešit zvětšením $\delta_{1-2,m}$. Další příčinou zvětšení vzdálenosti $\delta_{1-2,m}$ může být umístění vývodu z vinutí 1 na jeho vnějším průměru nebo je omezený sortiment vnitřních průměru forem pro zalévání vinutí 2. Pro hodnoty U_{m2} větší než 17,5 kV se vkládá mezi vinutí izolační válec.

Vzdálenost $\delta_{1-2,m}$ se vypočítá z hodnoty minimální elektrické vzdálenosti $\delta_{1-2,e}$ a odečtením tlouštěk izolací $b_{i1,ex}$ na vnějším průměru vinutí 2 a $b_{i2,in}$ na vnitřním průměru vinutí 2:

$$\delta_{1-2,m} = \delta_{1-2,e} - b_{i1,ex} - b_{i2,in} \quad (4.78)$$

Vzdálenost $\delta_{1-2,m}$ se zaokrouhluje na celé mm nahoru.

Mechanický vnitřní průměr $D_{w2,in,m}$ vinutí 2 se vypočítá z hodnoty mechanického vnějšího průměru $D_{w1,ex,m}$ vinutí 1 a vzdáleností $\delta_{1-2,m}$ mezi vinutími 1 a 2:

$$D_{w2,in,m} = D_{w1,ex,m} + 2 \cdot \delta_{1-2,m} \quad (4.79)$$

Elektrický vnitřní průměr $D_{w2,in,e}$ je pak:

$$D_{w2,in,e} = D_{w2,in,m} + 2 \cdot b_{i2,in} \quad (4.80)$$

Mechanický vnější průměr $D_{w2,ex,m}$ se vypočítá:

$$D_{w2,ex,m} = D_{w2,in,m} + 2 \cdot B_{w2,m} \quad (4.81)$$

Elektrický vnější průměr $D_{w2,ex,e}$ vinutí 2:

$$D_{w2,ex,e} = D_{w2,ex,m} - 2 \cdot b_{i2,ex} \quad (4.82)$$

Minimální elektrická vzdálenost $\delta_{f,e}$ mezi vnějšími průměry vinutí 2 různých fází se volí na základě rázového zkušebního napětí LI_2 vinutí 2 podle tabulek [19]. Mechanická vzdálenost $\delta_{f,m}$ mezi vinutími 2 dvou fází se pak vypočítá zmenšením $\delta_{l,e}$ o tloušťku izolací na vnějším průměru vinutí 2:

$$\delta_{f,m} = \delta_{f,e} - 2 \cdot b_{i2,ex} \quad (4.83)$$

Hodnota $\delta_{l,m}$ se zaokrouhluje na celá čísla.

4.8. Stanovení axiálních vzdáleností v okně magnetického obvodu

Axiální vzdálenost v okně L_j se stanovuje na základě minimálních elektrických vzdáleností horního δ_{h1} , δ_{h2} a dolního δ_{d1} , δ_{d2} konce vinutí 1 a 2 od povrchu horní a dolní spojky magnetického obvodu, které závisí na maximálním provozním napětí U_{mi} ($i = 1; 2$) a střídavého zkušebního napětí AC_i nebo impulsního zkušebního napětí LI_i , a z elektrické výšky vinutí $H_{wi,e}$. Vzdálenosti δ_{hi} a δ_{di} jsou uvedeny v tabulkách [19] společně s přesahem izolací na horních i dolních koncích vinutí i .

Pro jednotlivá vinutí se vypočítá minimální výška okna $L_{j,wi}$ následovně:

$$L_{j,w1} = H_{w1,e} + \delta_{h1} + \delta_{d1} \quad (4.84)$$

$$L_{j,w2} = H_{w2,e} + \delta_{h2} + \delta_{d2} \quad (4.85)$$

Konečná výška jádra magnetického obvodu L_j se zvolí jako větší z vypočítaných výšek okna $L_{j,w1}$ vinutí 1 a $L_{j,w2}$ vinutí 2.

4.9. Výpočet odporů vinutí

Ze znalosti elektrických průměrů $D_{w1,in,e}$, $D_{w1,ex,e}$ vinutí 1 a $D_{w2,in,e}$, $D_{w2,ex,e}$ vinutí 2, průřezu vodičů S_{w1} a S_{w2} , počtu závitů N_{z1} , $N_{z2,n}$ a $N_{z2,cel}$, druhů materiálů vinutí 1 a 2 a jejich měrných odporů ϱ_1 a ϱ_2 můžeme vypočítat odpory jedné fáze R_{f1} vinutí 1 a $R_{f2,n}$ vinutí 2 při zapojení jmenovité odbočky.

Nejprve se vypočítá odpor vinutí jedné fáze $R_{f,20^\circ C}$ pro teplotu $20^\circ C$, proto se pro výpočet použije měrný odpor materiálu $\varrho_{20^\circ C}$ při teplotě $20^\circ C$, a následně se přepočte pomocí teplotního součinitele α na provozní teplotu. Při výpočtu se použijí hodnoty měrného odporu $\varrho_{20^\circ C}$ a teplotního koeficientu α z Tab. 2.

Tab. 2 Hodnoty pro výpočet odporu vinutí

Materiál vinutí	Měrný odpor $\varrho_{20^\circ C}$ při $20^\circ C$ [$\Omega m \cdot 10^{-8}$]	Teplotní koeficient α [K^{-1}]
Měď (Cu)	1,786	0,00392
Hliník (Al)	2,941	0,00370

Odpor jedné fáze $R_{f1,20^\circ C}$ vinutí 1 při teplotě $20^\circ C$ se vypočítá z délky L_{v1} a průřezu vodiče S_{v1} . Protože pro vinutí 1 se nepoužívá paralelních vodičů, průřez vodiče S_{v1} je roven průřezu vinutí S_{w1} . Délka vodiče L_{v1} se vypočítá ze středního elektrického průměru vinutí 1 a počtu závitů N_{z1} :

$$L_{v1} = \pi \cdot \frac{D_{w1,in,e} + D_{w1,ex,e}}{2} \cdot N_{z1} \quad (4.86)$$

$$R_{f1,20^\circ C} = \varrho_{20^\circ C} \cdot \frac{L_{v1}}{S_{w1}} \quad (4.87)$$

Odpor jedné fáze $R_{f1,120^{\circ}\text{C}}$ při teplotě 120°C odpovídající teplotní třídě izolace F se vypočítá:

$$R_{f1,120^{\circ}\text{C}} = R_{f1,20^{\circ}\text{C}} \cdot [1 + (120 - 20) \cdot \alpha] \quad (4.88)$$

Odpor jedné fáze $R_{f2,n,120^{\circ}\text{C}}$ vinutí 2 při zapojením jmenovité odbočky se vypočítá obdobně jako pro vinutí 1:

$$L_{v2} = \pi \cdot \frac{D_{w2,in,e} + D_{w2,ex,e}}{2} \cdot N_{z2,n} \quad (4.89)$$

$$R_{f2,n,20^{\circ}\text{C}} = \varrho_{20^{\circ}\text{C}} \cdot \frac{L_{v2}}{S_{w2}} \quad (4.90)$$

$$R_{f2,n,120^{\circ}\text{C}} = R_{f2,n,20^{\circ}\text{C}} \cdot [1 + (120 - 20) \cdot \alpha] \quad (4.91)$$

Hodnoty odporů na ostatních odbočkách $R_{f2,k,120^{\circ}\text{C}}$ vinutí 2 se přepočtou v poměru počtu závitů $N_{z2,k}$ na odbočce a jmenovitého počtu závitů $N_{z2,n}$ vinutí 2, protože střední průměr vinutí 2 se pro zařazenou odbočku nemění:

$$R_{f2,k,120^{\circ}\text{C}} = R_{f2,n,120^{\circ}\text{C}} \cdot \frac{N_{z2,k}}{N_{z2,n}} \quad (4.92)$$

4.10. Výpočet ztrát nakrátko P_{kn}

Velikost jmenovitých ztrát nakrátko P_{kn} dvouvinutového transformátoru stanovíme jako součet hodnot jmenovitých ztrát nakrátko P_{k1} vinutí 1 a P_{k2} vinutí 2 a ztrát nakrátko v konstrukčních částech P_{ko} při referenční teplotě $\vartheta_{ref} = 120^{\circ}\text{C}$ odpovídající teplotní třídě izolace F:

$$P_{kn} = P_{k1} + P_{k2} + P_{ko} \quad (4.93)$$

Hodnota jmenovitých ztrát nakrátko P_{k1} se rovná součtu ohmických P_{ohm1} ztrát vinutí 1 při referenční teplotě, přídavných ztrát nakrátko P_{pod1} způsobených podélným rozptylovým magnetickým polem B_{pod} , přídavných ztrát nakrátko $P_{příč1}$ způsobených příčným magnetickým polem $B_{příč}$ a ohmickými ztrátami P_{vyv1} ve vývodech z vinutí 1:

$$P_{k1} = P_{ohm1} + P_{pod1} + P_{příč1} + P_{vyv1} \quad (4.94)$$

Ohmické ztráty P_{ohm1} vinutí 1 se při referenční teplotě 120°C vypočítají následovně:

$$P_{ohm1} = m \cdot R_{f1,120^{\circ}\text{C}} \cdot I_{nv1}^2 \quad (4.95)$$

Často se však ztráty nakrátko počítají z hodnoty skutečné proudové hustoty σ_l ve vinutí 1, váhy G_{w1} vodiče a měrných ztrát materiálu vodiče p_{kl} (ztráty v 1 kg materiálu při proudové hustotě 1 A/mm^2). Přitom váha G_{w1} vinutí 1 se vypočítá ze skutečného průřezu S_{w1} , délky L_{v1} vodiče a hustoty γ_l materiálu vinutí 1. Měrné ztráty vodičů p_{kl} při teplotě vinutí 120°C jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3 Hustota a měrné ztráty materiálu vinutí

Materiál vinutí	Hustota γ [kg/m^3]	Měrné ztráty p_k [$(\text{W/kg})/(\text{A/mm}^2)^2$]
Měď (Cu)	8900	2,793
Hliník (Al)	2700	14,609

Váha G_{w1} vinutí 1 je pak:

$$G_{w1} = m \cdot Y_1 \cdot L_{v1} \cdot S_{w1} \quad (4.96)$$

A ztráty P_{ohm1} ve vinutí 1 se vypočítají:

$$P_{ohm1} = G_{w1} \cdot p_{k1} \cdot \sigma_1^2 \quad (4.97)$$

Přídavné ztráty nakrátko způsobené podélným a příčným rozptylovým magnetickým polem B_{pod1} , $B_{příč1}$ a ohmické ztráty ve vývodech P_{vyv1} vinutí 1 se často sečítají do souhrnné hodnoty přídavných ztrát nakrátko $P_{příd1}$:

$$P_{příd1} = P_{pod1} + P_{příč1} + P_{vyv1} \quad (4.98)$$

Souhrnné přídavné ztráty $P_{příd1}$ se často odhadují v poměrné hodnotě c_{k1} vzhledem k velikosti ohmických ztrát P_{ohm1} :

$$c_{k1} = \frac{P_{příd1}}{P_{ohm1}} + 1 \quad (4.99)$$

Celkové jmenovité ztráty nakrátko P_{k1} vinutí 1 se potom vypočítají přímo z velikosti váhy G_{w1} , měrných ztrát p_{k1} , přídavných ztrát c_{k1} a proudové hustoty σ_1 :

$$P_{k1} = G_{w1} \cdot p_{k1} \cdot c_{k1} \cdot \sigma_1^2 \quad (4.100)$$

Jmenovité ztráty nakrátko P_{k2} vinutí 2 se vypočítají obdobně jako pro vinutí 1. V tomto případě jsou však ohmické ztráty ve vývodech vzhledem k velikosti proudů a dimenzování vývodů zanedbatelné, takže platí $P_{vyv2} = 0$:

$$G_{w2} = m \cdot Y_2 \cdot L_{v2} \cdot S_{w2} \quad (4.101)$$

$$P_{příd2} = P_{pod2} + P_{příč2} \quad (4.102)$$

$$c_{k2} = \frac{P_{příd2}}{P_{ohm2}} + 1 \quad (4.103)$$

$$P_{k2} = G_{w2} \cdot p_{k2} \cdot c_{k2} \cdot \sigma_2^2 \quad (4.104)$$

Ztráty nakrátko v konstrukčních částech budou v této práci zanedbány.

Hodnotu vypočtených jmenovitých ztrát nakrátko P_{kn} je nutné zkontrolovat, jestli souhlasí s požadavkem na garantované ztráty nakrátko určených „Eko-designem“.

4.11. Poměrné napětí nakrátko u_k

Velikost poměrného napětí nakrátko u_k stanovuje objednavatel, většinou se používá doporučená hodnota $u_k = 4 \%$ pro suché transformátory do výkonu $S_n = 630$ kVA, pro větší výkony je doporučena hodnota $u_k = 6 \%$ [19].

Z definice poměrné hodnoty napětí nakrátko u_k vyplývá, že se jedná o poměr velikosti napájecího napětí U_k , které je třeba na vznik jmenovitého proudu I_n při zkratovaném sekundárním vinutí, a hodnotou jmenovitého napětí U_n .

Komplexní napětí nakrátko u_k které má reálnou složku u_r (způsobenou úbytkem na resistenci) a imaginární složku u_x (úbytek na induktivní reaktanci). Pro velikost napětí nakrátko platí:

$$u_k = \sqrt{u_r^2 + u_x^2} \quad (4.105)$$

Reálnou složku u_r napětí nakrátko v % vypočítáme z velikosti jmenovitých ztrát nakrátko P_{kn} a velikosti jmenovitého výkonu S_n :

$$u_r = \frac{P_{kn}}{S_n} \cdot 100 \quad (4.106)$$

Induktivní složku u_x napětí nakrátko vypočítáme ze znalosti velikosti magnetického rozptylového magnetického toku Ψ_r ve vzduchových cestách v prostoru vinutí a velikosti hlavního toku Φ_j v magnetickém obvodu:

$$u_x = \frac{\Psi_r}{\Phi_j} \cdot 100 \quad (4.107)$$

Podle zákona celkového proudu platí, že v prostoru mezi dvěma nekonečně dlouhými válcovými tenkými cívkami s N závitů protékanými střídavými proudy s efektivní hodnotou I se vypočítá vrcholová hodnota intenzity magnetického pole H :

$$\oint H \cdot dl = N \cdot I \cdot \sqrt{2} \quad (4.108)$$

Pro vrcholovou hodnotu rozptylové magnetické indukce B_r mezi vinutími reálné výšky H_w a reálné šířky $B_{wi,e}$ můžeme potom vztah přepsat:

$$B_r = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N_{zi} \cdot I_{nvi} \cdot \sqrt{2} \cdot k_r}{H_w} \quad (4.109)$$

Kde k_r je hodnota Rogowského činitele, která se vypočítá z rozměrů reálných vinutí podle (4.115), μ_0 je hodnota permeability vakua, μ_r je hodnota relativní permeability vzduchu, $\mu_r = 1$.

Velikost magnetického rozptylového toku Ψ_r ve vzduchových cestách vypočítáme z velikosti plochy S_r , kterou magnetický rozptylový tok Ψ_r protéká a velikosti vrcholové hodnoty magnetické indukce B_r v prostu mezi vinutími:

$$\Psi_r = B_r \cdot S_r \quad (4.110)$$

V prostoru vnitřního vinutí 1 hodnota magnetické indukce B vzrůstá lineárně z nulové hodnoty na vnitřním průměru $D_{w1,in,e}$ až na plnou hodnotu B na vnějším průměru $D_{w1,ex,e}$ vinutí 1. V prostoru mezi vinutím 1 a 2 má magnetická indukce B konstantní hodnotu danou (4.109). V prostoru vinutí 2 hodnota B klesá lineárně z plné hodnoty B na vnitřním průměru $D_{w2,in,e}$ až na nulovou hodnotu B na vnějším průměru $D_{w2,ex,e}$ vinutí 2.

Pro výpočet plochy S_r , kterou prochází rozptylový tok Ψ_r ve vzduchových cestách použít součin redukované šířky vinutí δ_r a středního obvodu rozptylového toku o_r :

$$S_r = \delta_r \cdot o_r \quad (4.111)$$

Kde:

$$\delta_r = \frac{D_{w1,ex,e} - D_{w1,in,e} + D_{w2,ex,e} - D_{w2,in,e}}{6} + \frac{D_{w2,in,e} - D_{w1,ex,e}}{2} \quad (4.112)$$

$$o_r = \pi \cdot \left[D_{w1,in,e} + \delta_r + \frac{2}{3} \cdot (D_{w1,ex,e} - D_{w1,in,e}) \right] \quad (4.113)$$

Hlavní magnetický tok Φ_j v průřezu magnetického obvodu vypočítáme jako součin vrcholové hodnoty magnetické indukce B_j v jádře a čistého průřezu železa v jádře S_j :

$$\Phi_j = B_j \cdot S_j \quad (4.114)$$

Hodnotu části hlavního magnetického toku v prostoru mezi vinutím a jádrem lze vynechat, protože díky poměru velikostí relativní permeability v jádře a ve vzduchu je zanedbatelná.

Hodnota Rogowského činitele k_r se vypočítá z vnějšího elektrického průměru $D_{w2,e}$ vinutí 2, z vnitřního elektrického průměru $D_{w1,in,e}$ vinutí 1 a výšky vinutí H_w podle vztahu:

$$k_r = 1 - \frac{D_{w2,ex,e} - D_{w1,in,e}}{2 \cdot \pi \cdot H_w} \quad (4.115)$$

Výška vinutí H_w ve vztazích (4.109) a (4.115) se při nestejných výškách $H_{w1,e}$ a $H_{w2,e}$ vypočítá jako jejich aritmetický průměr:

$$H_w = \frac{H_{w1,e} + H_{w2,e}}{2} \quad (4.116)$$

Pro stanovení přesnější hodnoty poměrné reaktance u_x se používají další dodatečné výpočty, které respektují vlivy příčných rozptylových toků v prostoru vinutí vyvolané:

- Zkrácením elektrické výšky $H_{w2,e}$ vinutí 2 oproti elektrické výšce $H_{w1,e}$
- Vlivem mezery $H_{w2,ax}$ uprostřed výšky vinutí 2

V této práci budou tyto vlivy však zanedbány.

4.12. Výpočet ztrát naprázdno P_{on}

Ztráty naprázdno P_o vznikající při průmyslových kmitočtech v magnetickém obvodu transformátoru mají dvě základní složky, hysterezní ztráty P_{oh} a ztráty P_{oe} způsobené vířivými proudy v materiálu plechů. Ztráty způsobené magnetizačním proudem I_o ve vinutí transformátorů lze vzhledem k jeho velikosti zanedbat.

Mírou měrných hysterezních ztrát p_{oh} je plocha hysterezní smyčky vznikající při střídavém přemagnetování magnetického materiálu plechů magnetického obvodu. Tvar smyčky je značně ovlivněn chemickým složením materiálu a jeho technologickým zpracováním.

Velikost měrných hysterezních ztrát p_{oh} závisí na součiniteli η (charakterizovaným chemickým a technologickým zpracováním), lineárně na frekvenci f přemagnetování a vrcholové hodnotě magnetické indukce B_{max} s exponentem x , jehož hodnota je větší než 1,6 a závisí na hodnotě magnetické indukce B_{max} :

$$p_{oh} = \eta \cdot f \cdot B_{max}^x \quad (4.117)$$

Ztráty vířivými proudy jsou vyvolány průchodem střídavého magnetického toku příčnou plochou transformátorového plechu. V materiálu plechu vyvolá tento magnetický tok vznik indukovaných napětí, která protlačují materiálem plechu vířivé proudy, jejichž velikost je ovlivněná elektrickým odporem materiálu plechů.

Velikost měrných ztrát vířivými proudy p_{oe} závisí přímo úměrně na druhé mocnině tloušťky plechů t_{pl} , druhé mocnině kmitočtu f přemagnetování, druhé mocnině efektivní hodnoty magnetické indukce B_{rms} a nepřímo úměrně měrnému odporu ρ materiálu plechů:

$$p_{oe} = \frac{k}{\rho} \cdot t_{pl}^2 \cdot f^2 \cdot B_{rms}^2 \quad (4.118)$$

Kde k je konstanta daná materiálem plechů.

Při výpočtu ztrát naprázdno celého magnetického obvodu můžeme v prvním přiblížení předpokládat, že tvar magnetického obvodu je navržen tak, aby všechny průřezy jader a spojek byly stejné. Tím je splněn předpoklad stejné hodnoty magnetické indukce B_j v celém magnetickém obvodu. Potom ztráty naprázdno P_o lze vypočítat jako jednoduchý násobek celkové váhy magnetického obvodu G_{Fe} a měrných ztrát naprázdno p_o , které jsou součtem ztrát hysterezních p_{oh} a ztrát vířivými proudy p_{oe} :

$$p_o = p_{oh} + p_{oe} \quad (4.119)$$

Výrobce plechů udává pro jednotlivé druhy transformátorových plechů změřené a ze statistiky ověřené hodnoty měrných ztrát naprázdno p_o v závislosti na velikosti vrcholové hodnoty magnetické indukce B_{max} a frekvenci přemagnetování f buď formou tabulek nebo křivek $p_o = f(B_{max}, f)$.

Celková váha G_{Fe} magnetického obvodu se vypočítá z jeho rozměrů jako je výška okna L_j , rozteč jader M_j , délka spojek L_o , průměru D_j kružnice opsané hranám paketů odstupňovaného průřezu, průřezu jádra S_j a měrné váhy γ_{Fe} materiálu plechů a počtu jader m magnetického obvodu.

Rozteč jader se vypočítá z vnějšího mechanického rozměru $D_{w2,ex,m}$ vinutí 2 a mechanické vzdálenosti $\delta_{f,m}$ mezi sousedními vinutími 2:

$$M_j = D_{w2,ex,m} + \delta_{f,m} \quad (4.120)$$

Délka spojek L_o se vypočítá jako součet dvojnásobku rozteče jader M_j a průměru D_j :

$$L_o = 2 \cdot M_j + D_j \quad (4.121)$$

Váha spojek G_s se potom vypočítá:

$$G_s = 2 \cdot S_j \cdot L_o \cdot \gamma_{Fe} \quad (4.122)$$

Váha jader G_j se vypočítá:

$$G_j = m \cdot S_j \cdot (L_j + 0,0272 \cdot D_j) \cdot \gamma_{Fe} \quad (4.123)$$

U vzduchových transformátorů se z důvodu snazšího průchodu chladicího vzduchu do a z vinutí dělá průřez spojky symetrický, stejný jako je odstupňování jádra. Proto jsou jádrové plechy kromě hlavního paketu delší nežli je výška okna L_j a ve výpočtu váhy jader se vkládá člen $+0,0272 \cdot D_j$.

Celková váha magnetického obvodu G_{Fe} se pak určí jako součet váhy jader G_j a váhy spojek G_s :

$$G_{Fe} = G_j + G_s \quad (4.124)$$

Výsledná jmenovitá hodnota ztrát naprázdno P_{on} se stanoví jako součin měrných ztrát naprázdno p_o , celkové váhy magnetického obvodu a součinitele přídavných ztrát naprázdno k_{po} :

$$P_{on} = p_o \cdot G_{Fe} \cdot k_{po} \quad (4.125)$$

Velikost součinitele přídavných ztrát naprázdno k_{po} se odhaduje podle poměru délky jader L_j a průměru D_j kružnice opsané hranám paketů odstupňovaného jádra v mezích 1,12 – 1,18.

4.13. Výpočet oteplení transformátoru

Pro výpočet oteplení suchého transformátoru jsou důležitá vstupní data týkající se ztrát v magnetickém obvodu a vinutí. Je tedy nutné znát hodnoty ztrát naprázdno P_{on} při

jmenovitým napětí, ztrát nakrátko P_{k1} vnitřního vinutí 1 (NN) a P_{k2} vnějšího vinutí 2 (VN). Dále je zapotřebí znát kompletní geometrii transformátoru pro výpočet chladicích ploch, tepelná zatížení povrchů q , součinitele přestupu tepla α na svislých plochách a tepelné vodivosti λ materiálů. Pro chlazení budou brány v potaz pouze svislé plochy vinutí, protože velikost vodorovných ploch vinutí je malá a součinitelé přestupu tepla mají rovněž malé hodnoty a tak se můžou zanedbat.

4.13.1 Oteplení ze ztrát naprázdno

Ztráty naprázdno $P_{j,Fe}$, které se odvedou chladicím povrchem jader v m jádrech magnetického obvodu, určíme ze ztrát naprázdno samotných jader zmenšených odvedením části těchto ztrát vlivem tepelné vodivosti spojek. Koeficient k_j je podíl ztrát naprázdno chlazených povrchem jádra:

$$P_{j,Fe} = k_j \cdot P_{on} \quad (4.126)$$

Chladicí plocha $S_{ch,j}$ jader magnetického obvodu se stanoví jako plocha m válců o průměru D_j a výšce jádra L_j :

$$S_{ch,j} = m \cdot \pi \cdot D_j \cdot L_j \quad (4.127)$$

Tepelné zatížení povrchu jádra q_j se stanoví jako podíl ztrát odváděných povrchem jádra $P_{j,Fe}$ podělený svislou chladicí plochou jádra $S_{ch,j}$. U suchých výkonových transformátorů se nepředpokládá zmenšení chladicí plochy vlivem zakrytí povrchu jádra distančními klín, u malých průměrů jádra může hrát zakrytí významnější roli:

$$q_j = \frac{P_{j,Fe}}{S_{ch,j}} \quad (4.128)$$

Pro oteplení povrchu jádra magnetického obvodu $\Delta\vartheta_j$ je nutné znát součinitel přestupu tepla α_j , jeho hodnoty jsou uvedeny v tabulkách [20]. Oteplení povrchu jádra magnetického obvodu se vypočítá jako podíl tepelného zatížení q_j a součinitele přestupu tepla α_j :

$$\Delta\vartheta_j = \frac{q_j}{\alpha_j} \quad (4.129)$$

Oteplení $\Delta\vartheta_{j1}$ vnitřního vinutí 1 a $\Delta\vartheta_{j2}$ vlivem ztrát naprázdno P_{on} se vypočítají následovně:

$$\Delta\vartheta_{j1} = \frac{\Delta\vartheta_j}{k_{j1}} \quad (4.130)$$

$$\Delta\vartheta_{j2} = \frac{\Delta\vartheta_j}{k_{j2}} \quad (4.131)$$

Kde k_{j1} a k_{j2} jsou součinitele pro přepočítání oteplení vnitřního vinutí 1, respektive vnějšího vinutí 2 od ztrát jádra.

4.13.2 Oteplení ze ztrát nakrátko pro vnitřní vinutí 1

V případě, že se ve vinutí 1 nevyskytují žádné axiální chladicí kanály, provede se výpočet jeho oteplení následovně. Nejdříve se vypočítá velikost vnitřní $S_{ch,w1,in}$ a vnější $S_{ch,w1,ex}$ chladicí plochy vinutí 1:

$$S_{ch,w1,in} = m \cdot \pi \cdot D_{w1,in,m} \cdot H_{w1,m} \quad (4.132)$$

$$S_{ch,w1,ex} = m \cdot \pi \cdot D_{w1,ex,m} \cdot H_{w1,m} \quad (4.133)$$

Předběžné tepelné zatížení povrchu q_{p1} vinutí 1 se stanoví v prvním přiblížení jako podíl ztrát nakrátko P_{k1} ve vinutí 1 dělený celkovou svislou chladicí plochou vinutí 1:

$$q_{p1} = \frac{P_{k1}}{S_{ch,w1,in} + S_{ch,w1,ex}} \quad (4.134)$$

Předběžné hodnoty oteplení vnitřního $\Delta\vartheta_{p1,in}$ a vnějšího $\Delta\vartheta_{p1,ex}$ povrchu se vypočítají (hodnoty součinitelů přestupu tepla $\alpha_{1,in}$ a $\alpha_{1,ex}$ jsou v [20]):

$$\Delta\vartheta_{p1,in} = \frac{q_{p1}}{\alpha_{1,in}} \quad (4.135)$$

$$\Delta\vartheta_{p1,ex} = \frac{q_{p1}}{\alpha_{1,ex}} \quad (4.136)$$

Protože vnější chladicí plocha $S_{ch,w1,ex}$ je vždy větší nežli vnitřní chladicí plocha $S_{ch,w1,in}$ a součinitelé $\alpha_{1,in}$ a $\alpha_{1,ex}$ na vnitřním a vnějším povrchu mají různé hodnoty, přepočítá se tepelné zatížení $q_{1,in}$ na vnitřním a $q_{1,ex}$ na vnějším povrchu v nepřímém poměru předběžných hodnot oteplení $\Delta\vartheta_{p1,in}$ a $\Delta\vartheta_{p1,ex}$ ke střední hodnotě $\Delta\vartheta_{p1}$:

$$q_{1,in} = q_{p1} \cdot \frac{2}{\Delta\vartheta_{p1,in} + \Delta\vartheta_{p1,ex}} \cdot \Delta\vartheta_{p1,ex} \quad (4.137)$$

$$q_{1,ex} = q_{p1} \cdot \frac{2}{\Delta\vartheta_{p1,in} + \Delta\vartheta_{p1,ex}} \cdot \Delta\vartheta_{p1,in} \quad (4.138)$$

Výsledná hodnota oteplení $\Delta\vartheta_{1,in}$ a $\Delta\vartheta_{1,ex}$ vnitřního a vnějšího povrchu vinutí 1 se vypočítají jako:

$$\Delta\vartheta_{1,in} = \frac{q_{1,in}}{\alpha_{1,in}} \quad (4.139)$$

$$\Delta\vartheta_{1,ex} = \frac{q_{1,ex}}{\alpha_{1,ex}} \quad (4.140)$$

Střední oteplení povrchu vinutí 1 $\Delta\vartheta_1$ se pak vypočítá:

$$\Delta\vartheta_1 = \frac{\Delta\vartheta_{1,in} + \Delta\vartheta_{1,ex}}{2} \quad (4.141)$$

Spád oteplení $\delta\vartheta_{1,in}$ od vnitřního povrchu vinutí 1 směrem dovnitř vinutí 1 se vypočítá:

$$\delta\vartheta_{1,in} = \frac{b_{i1}}{\lambda_{i1}} \cdot N_{z1} \cdot 0,33 \cdot q_{i,in} \quad (4.142)$$

Spád oteplení $\delta\vartheta_{1,ex}$ od vnějšího povrchu vinutí 1 směrem dovnitř vinutí 1 se vypočítá obdobně:

$$\delta\vartheta_{1,ex} = \frac{b_{i1}}{\lambda_{i1}} \cdot N_{z1} \cdot 0,33 \cdot q_{i,ex} \quad (4.143)$$

Do výpočtu středního oteplení vinutí 1 se vybere větší z hodnot spádu oteplení:

$$\delta\vartheta_1 = \max\{\delta\vartheta_{1,in}; \delta\vartheta_{1,ex}\} \quad (4.144)$$

Střední oteplení $\Delta\vartheta_{w1}$ vinutí 1 vlivem ztrát nakrátko P_{k1} se stanoví jako součet středního oteplení vnějšího povrchu $\Delta\vartheta_1$ a spádu oteplení $\delta\vartheta_1$ do vnitřku vinutí 1 (spád na vnitřní izolaci vinutí):

$$\Delta\vartheta_{w1} = \Delta\vartheta_1 + \delta\vartheta_1 \quad (4.145)$$

Výsledné oteplení $\Delta\vartheta_{w1+}$ vnitřního vinutí 1 při jmenovitém provozu (od ztrát naprázdno P_{on} plus nakrátko P_{kl}) se vypočítá z hodnot středního oteplení $\Delta\vartheta_{w1}$ a oteplení $\Delta\vartheta_{j1}$ vnitřního vinutí 1 vlivem ztrát naprázdno P_{on} následovně:

$$\Delta\vartheta_{w1+} = \Delta\vartheta_{w1} \cdot \left[1 + \left(\frac{\Delta\vartheta_{j1}}{\Delta\vartheta_{w1}} \right)^{1,25} \right]^{0,80} \quad (4.146)$$

Výsledné oteplení žádného vinutí v tepelné třídě F nesmí přesáhnout střední dovolené oteplení $\Delta\vartheta_d = 100$ K.

4.13.3 Oteplení ze ztrát nakrátko pro vnější vinutí 2

Pokud se ve vinutí 2 nevyskytují žádné axiální chladicí kanály, výpočet jeho oteplení má stejný postup jako pro vinutí 1 až po výpočet středního oteplení povrchu vinutí $\Delta\vartheta_2$.

Spád oteplení $\delta\vartheta_{2,in}$ na vnitřním povrchu na izolaci $b_{i2,in}$ vinutí 2 se vypočítá:

$$\delta\vartheta_{2,in} = \frac{b_{i2,in}}{\lambda_{i1}} \cdot q_{2,in} \quad (4.147)$$

Spád oteplení $\delta\vartheta_{2,ex}$ na vnějším povrchu na izolaci $b_{i2,ex}$ vinutí 2 se vypočítá:

$$\delta\vartheta_{2,ex} = \frac{b_{i2,ex}}{\lambda_{i1}} \cdot q_{2,ex} \quad (4.148)$$

Střední oteplení $\Delta\vartheta_{w2}$ do vnitřku vinutí 2 je:

$$\Delta\vartheta_{w2} = \Delta\vartheta_2 + \max\{\delta\vartheta_{2,in}; \delta\vartheta_{2,ex}\} \quad (4.149)$$

Oteplení vnějšího vinutí 2 při jmenovitém provozu $\Delta\vartheta_{w2+}$ (od ztrát naprázdno P_{on} a nakrátko P_{kl}) bude mít hodnotu:

$$\Delta\vartheta_{w2+} = \Delta\vartheta_{w2} \cdot \left[1 + \left(\frac{\Delta\vartheta_{j2}}{\Delta\vartheta_{w2}} \right)^{1,25} \right]^{0,80} \quad (4.150)$$

5. PŘÍKLAD VÝPOČTU

Vstupní údaje jsou uvedené v Tab. 4. Údaje jako jsou nejvyšší provozní napětí, střídavé zkušební nebo impulsní napětí, byly zvoleny jako nejběžnější pro daný typ transformátoru.

Tab. 4 Vstupní parametry pro výpočet konkrétního suchého transformátoru

Název parametru	Značení	Jednotka	Velikost
Jmenovitý výkon transformátoru	S_n	[kVA]	1000
Jmenovité napětí strany nižšího napětí (NN - vnitřního)	U_{n1}	[V]	400
Jmenovité napětí strany vyššího napětí (VN - vnějšího)	U_{n2}	[V]	22000
Eco-design	ED	[-]	Ano
Rozsah plus odboček strany vyššího napětí	$ro+$	[%]	5
Rozsah minus odboček strany vyššího napětí	$ro-$	[%]	5
Počet odboček strany vyššího napětí	n_{odb}	[-]	5
Jmenovitá frekvence	f_n	[Hz]	50
Počet fází systému	m	[-]	3
Skupina spojení strany vyššího napětí	G_{VN}	[-]	D
Skupina spojení strany nižšího napětí	G_{NN}	[-]	y
Hodinové číslo	$H\check{C}$	[-]	1
Jmenovité napětí nakrátko	u_k	[%]	6
Jmenovité ztráty naprázdno	P_{on}	[W]	1500
Jmenovité ztráty nakrátko	P_{kn}	[W]	9000
Třída izolace transformátoru	TI	[-]	F
Způsob chlazení	CH	[-]	AN
Nejvyšší provozní napětí vinutí 1	U_{m1}	[kV]	1,1
Nejvyšší provozní napětí vinutí 2	U_{m2}	[kV]	24
Střídavé zkušební napětí 1	AC_1	[kV]	3
Střídavé zkušební napětí 2	AC_2	[kV]	50
Impulsní napětí vinutí 1	LI_1	[kV]	0
Impulsní napětí vinutí 2	LI_2	[kV]	125
Hladina hluku, akustický výkon	LWA	[dB(A)]	65

Dále se postupuje ve výpočtu podle předchozí kapitoly, tentokrát již s číselným dosazením.

5.1. Výpočet jmenovitých fázových napětí a proudů v přípojnicích a ve vinutích

Velikosti jmenovitých fázových napětí U_{nf} se vypočítají následovně, pro stranu NN, tedy vinutí 1 platí pro výpočet U_{nf1} :

$$U_{nf1} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230,940 \text{ V} \quad (5.1)$$

Jmenovité fázové napětí U_{nf2} nepotřebujeme, protože vinutí 2 (VN) je zapojené do trojúhelníku D.

Jmenovité proudy I_{np1} a I_{np2} v přípojnicích jsou:

$$I_{np1} = \frac{S_n}{U_{ns1} \cdot \sqrt{m}} = \frac{1 \cdot 10^6}{400 \cdot \sqrt{3}} = 1443,376 \text{ A} \quad (5.2)$$

$$I_{np2} = \frac{S_n}{U_{ns2} \cdot \sqrt{m}} = \frac{1 \cdot 10^6}{22000 \cdot \sqrt{3}} = 26,243 \text{ A} \quad (5.3)$$

Pro vinutí 2 je nutné vypočítat jmenovitý proud I_{np2} , který teče vinutím, protože je zapojené do trojúhelníku:

$$I_{nv2} = \frac{I_{np2}}{\sqrt{m}} = \frac{26,243}{\sqrt{3}} = 15,151 \text{ A} \quad (5.4)$$

Ve vinutí 1 je proud ve vinutí I_{nv1} stejný jako v přípojnici I_{np1} , jelikož vinutí je zapojené do hvězdy:

$$I_{nv1} = I_{np1} = 1443,376 \text{ A} \quad (5.5)$$

5.2. Volba parametrů průřezu magnetického obvodu

Doporučená velikost kružnice opsané průřezu jádra magnetického obvodu $D_{j,dop}$ vychází:

$$D_{j,dop} = \sqrt{\frac{S_n}{17}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^6}{17}} = 242,535 \text{ mm} \quad (5.6)$$

Zvolená velikost kružnice opsané D_j podle nejvíce podobného transformátoru je:

$$D_j = 255 \text{ mm} \quad (5.7)$$

Zvoleným druhem plechů je M120-27S s počtem stupňů odstupňovaného průřezu $n_{stup} = 8$. Takto zvolené jádro magnetického obvodu má činitel plnění $k_{p,Fe} = 0,7817$.

5.3. Výpočet průřezu magnetického obvodu

Čistý průřez jádra magnetického obvodu S_j se vypočítá z průměru D_j a součinitele plnění jádra $k_{p,Fe}$, jehož hodnota vychází ze zvoleného jádra podobného transformátoru:

$$S_j = \frac{\pi \cdot D_j^2 \cdot k_{p,Fe}}{4} = \frac{\pi \cdot 0,255^2 \cdot 0,7817}{4} = 39921,8 \text{ mm}^2 \quad (5.8)$$

5.4. Návrh hodnoty magnetické indukce v jádře

Na základě optimalizačního firemního programu, byla magnetická indukce v jádře B_j zvolena tak, aby transformátor odpovídal požadavkům Eco-designu a zároveň byl co nejekonomičtější:

$$B_j = 1,45 \text{ T} \quad (5.9)$$

5.5. Výpočet počtu závitů

V prvním kroku navrhne počet závitů na straně vinutí 1 (nižšího napětí) N_{z1} :

$$N_{z1} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{nf1}}{2\pi \cdot B_j \cdot S_j \cdot f_n} = \frac{\sqrt{2} \cdot 230,940}{2\pi \cdot 1,45 \cdot 0,0399218 \cdot 50} \doteq 18 \quad (5.10)$$

Jmenovitý počet závitů $N_{z2,n}$ na straně vinutí 2 (VN):

$$N_{z2,n} = \frac{U_{ns2}}{U_{nf1}} \cdot N_{z1} = \frac{22000}{230,940} \cdot 18 \doteq 1715 \quad (5.11)$$

Celkový počet závitů $N_{z2,cel}$ vinutí 2 je pak:

$$N_{z2,cel} = N_{z2,n} \cdot \frac{100 + r_o}{100} = 1715 \cdot \frac{100 + 5}{100} \doteq 1801 \quad (5.12)$$

Následně se vypočítá přesná hodnota magnetické indukce jádra B_j :

$$B_j = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{nf1}}{2\pi \cdot N_{z1} \cdot S_j \cdot f_n} = \frac{\sqrt{2} \cdot 230,940}{2\pi \cdot 18 \cdot 0,0399218 \cdot 50} = 1,447 \text{ T} \quad (5.13)$$

5.6. Volba základních parametrů, rozměrů a průřezů vinutí

Jako materiál vodiče pro obě vinutí je zvolen hliník, protože je cenově mnohem výhodnější než měď. Dále byly na základě firemního optimalizačního programu zvoleny následující proudové hustoty σ_1 ve vinutí 1 a σ_2 ve vinutí 2:

$$\sigma_1 = 1,215 \text{ A/mm}^2 \quad (5.14)$$

$$\sigma_2 = 1,176 \text{ A/mm}^2 \quad (5.15)$$

Při návrhu nejsou uvažovány chladičí kanálky, protože se nejedná o tak velký výkon transformátoru, aby bylo jejich použití výhodné.

5.6.1 Vinutí 1 (NN)

Vinutí na straně nižšího napětí bude vzhledem k velikosti napětí jednoznačně fóliové. Průřez vinutí je pak:

$$S_{w1} = S_{v1} = \frac{I_{nv1}}{\sigma_1} = \frac{1443,376}{1,215} = 1188 \text{ mm}^2 \quad (5.16)$$

Výška vodiče h_{v1} a zároveň elektrická výška $H_{w1,e}$ vinutí 1 se volí:

$$h_{v1} = H_{w1,e} = 990 \text{ mm} \quad (5.17)$$

Šířku fóliového vinutí b_{v1} se potom vypočítá:

$$b_{v1} = \frac{S_{w1}}{H_{w1,e}} = \frac{1188}{990} \doteq 1,2 \text{ mm} \quad (5.18)$$

Mechanická výška $H_{w1,m}$ vinutí 1 má při zvolení přesahu izolace $h_{i1} = 15 \text{ mm}$ na horní i dolní straně vinutí v axiálním směru hodnotu:

$$H_{w1,m} = H_{w1,e} + 2 \cdot h_{i1} = 990 + 2 \cdot 15 = 1020 \text{ mm} \quad (5.19)$$

Mechanický radiální rozměr (šířka) $B_{w1,m}$ vinutí 1 má při zvolené mezizávítové izolace b_{i1} podle primárního napětí hodnotu:

$$B_{w1,m} = N_{z1} \cdot (b_{v1} + b_{i1}) = 18 \cdot (1,2 + 0,185) = 24,93 \quad (5.20)$$

$$\doteq 25 \text{ mm}$$

Elektrický radiální rozměr $B_{w1,e}$ fóliového vinutí 1 se stanoví zmenšením mechanického radiálního rozměru $B_{w1,m}$ o šířku izolace na vnitřním průměru $b_{i1,in}$ a vnějším průměru $b_{i1,ex}$, které mají v tomto případě stejnou hodnotu jako mezizávítová izolace b_{i1} :

$$B_{w1,e} = B_{w1,m} - b_{i1,in} - b_{i1,ex} = 25 - 0,185 - 0,185 \quad (5.21)$$

$$= 24,63 \text{ mm}$$

5.6.2 Vinutí 2 (VN)

Pro výpočet vinutí 2 zvolíme často používané sypané vinutí. Průřez vinutí S_{w2} je roven průřezu vodiče S_{v2} , protože u sypaného vinutí se nepoužívá paralelního vodiče. Průřez se vypočítá z proudu I_{nv2} jdoucího vinutím a proudové hustoty σ_2 :

$$S_{w2} = S_{v2} = \frac{I_{nv2}}{\sigma_2} = \frac{15,151}{1,176} = 12,884 \text{ mm}^2 \quad (5.22)$$

Průměr kruhového holého vodiče $d_{v2,e}$ se vypočítá z průřezu vinutí S_{w2} :

$$d_{v2,e} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{w2}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 12,883}{\pi}} \doteq 4,05 \text{ mm} \quad (5.23)$$

Vodič má lakovou izolaci oboustranné tloušťky $i_{v2} = 0,16$ mm, mechanický průměr vodiče $d_{v2,m}$ se vypočítá:

$$d_{v2,m} = d_{v2,e} + i_{v2} = 4,05 + 0,16 = 4,21 \text{ mm} \quad (5.24)$$

Technologický koeficient plnění vinutí $k_{p,s}$ je zvolen univerzálně:

$$k_{p,s} = 0,70 \quad (5.25)$$

Pro elektrickou výšku $H_{w2,e}$ vinutí 2 platí při snížení výšky na obou koncích $f_2 = 5$ mm:

$$H_{w2,e} = H_{w1,e} - 2 \cdot f_2 = 990 - 2 \cdot 5 = 980 \text{ mm} \quad (5.26)$$

Axiální rozměr $H_{w2,er}$ prostoru pro navíjení sypaného vinutí se vypočítá z elektrické výšky $H_{w2,e}$ vinutí 2 a velikosti axiální mezery $H_{w2,ax}$ mezi polovinami vinutí.

$$H_{w2,er} = H_{w2,e} - H_{w2,ax} = 980 - 10 = 970 \text{ mm} \quad (5.27)$$

Elektrická šířka $B_{w2,e}$ sypaného vinutí se stanoví:

$$B_{w2,e} = \frac{\pi \cdot d_{v2,m}^2 \cdot N_{z2,cel}}{4 \cdot H_{w2,er} \cdot k_{p,s}} = \frac{\pi \cdot 4,21^2 \cdot 1801}{4 \cdot 970 \cdot 0,70} \doteq 37 \text{ mm} \quad (5.28)$$

Mechanická výška $H_{w2,m}$ vinutí 2 se vypočítá ze skutečné elektrické výšky $H_{w2,e}$ vinutí 2 a izolačních přírůstků $h_{i2,h}$ a $h_{i2,d}$ na koncích vinutí v axiálním směru, které mají obě stejnou hodnotu $h_{i2,h} = h_{i2,d} = 20$ mm:

$$H_{w2,m} = H_{w2,e} + h_{i2,h} + h_{i2,d} = 980 + 20 + 20 \quad (5.29)$$

$$= 1020 \text{ mm}$$

Mechanická šířka $B_{w2,m}$ má velikost podle volby tloušťek vnějších izolací na vnitřním a vnějším průměru $b_{i2,in}$, $b_{i2,e}$:

$$B_{w2,m} = B_{w2,e} + b_{i2,in} + b_{i2,ex} = 37 + b_{i2,in} + b_{i2,ex} = 43 \text{ mm} \quad (5.30)$$

Dále se musí určit počet závitů pro každou odbočku:

$$N_{z2,k} = \frac{N_{z2,cel}}{2} + \left(\frac{k}{2} - 1\right) \cdot (N_{z2,cel} - N_{z2,n}) \quad (5.31)$$

$$k = 0: N_{z2,k} = \frac{1801}{2} + \left(\frac{0}{2} - 1\right) \cdot (1801 - 1715) \doteq 815 \quad (5.32)$$

$$k = 1: N_{z2,k} = \frac{1801}{2} + \left(\frac{1}{2} - 1\right) \cdot (1801 - 1715) \doteq 858 \quad (5.33)$$

$$k = 2: N_{z2,k} = \frac{1801}{2} + \left(\frac{2}{2} - 1\right) \cdot (1801 - 1715) \doteq 901 \quad (5.34)$$

$$k = 3: N_{z2,k} = \frac{1801}{2} + \left(\frac{3}{2} - 1\right) \cdot (1801 - 1715) \doteq 944 \quad (5.35)$$

$$k = 4: N_{z2,k} = \frac{1801}{2} + \left(\frac{4}{2} - 1\right) \cdot (1801 - 1715) \doteq 987 \quad (5.36)$$

Kontrola převodu se provede podle vzorce:

$$\left| 0,950 + k \cdot 0,025 - \frac{N_{z2,cel} - N_{z2,4} + N_{z2,k}}{N_{z2,n}} \right| < 0,005 \quad (5.37)$$

$$k = 0: \left| 0,950 + 0 \cdot 0,025 - \frac{1801 - 987 + 815}{1715} \right| = 1,46 \cdot 10^{-4} < 0,005 \quad (5.38)$$

$$k = 1: \left| 0,950 + 1 \cdot 0,025 - \frac{1801 - 987 + 858}{1715} \right| = 7,29 \cdot 10^{-5} < 0,005 \quad (5.39)$$

$$k = 2: \left| 0,950 + 2 \cdot 0,025 - \frac{1801 - 987 + 901}{1715} \right| = 0 < 0,005 \quad (5.40)$$

$$k = 3: \left| 0,950 + 3 \cdot 0,025 - \frac{1801 - 987 + 944}{1715} \right| = 7,29 \cdot 10^{-5} < 0,005 \quad (5.41)$$

$$k = 4: \left| 0,950 + 3 \cdot 0,025 - \frac{1801 - 987 + 987}{1715} \right| = 1,46 \cdot 10^{-4} < 0,005 \quad (5.42)$$

Převody odboček vycházejí v rámci povolené odchylky, tudíž můžeme pokračovat v návrhu.

5.7. Určení elektrických a mechanických průměrů vinutí a axiálních vzdáleností v okně magnetického obvodu

Mechanický vnitřní průměr $D_{w1,in,m}$ se vypočítá:

$$D_{w1,in,m} = D_j + 2 \cdot \delta_{j-1} = 255 + 2 \cdot \delta_{j-1} = 271 \text{ mm} \quad (5.43)$$

Elektrický vnitřní průměr $D_{w1,in,e}$ vinutí 1 je:

$$D_{w1,in,e} = D_{w1,in,m} + 2 \cdot b_{i1,in} = 271 + 2 \cdot b_{i1,in} = 271,4 \text{ mm} \quad (5.44)$$

Mechanický vnější průměr $D_{w1,ex,m}$ je potom:

$$D_{w1,ex,m} = D_{w1,in,m} + 2 \cdot B_{w1,m} = 271 + 2 \cdot 25 = 321 \text{ mm} \quad (5.45)$$

Elektrický vnější průměr $D_{w1,ex,e}$ vinutí 1:

$$D_{w1,ex,e} = D_{w1,ex,m} - 2 \cdot b_{i1,ex} = 321 - 2 \cdot b_{i1,ex} = 320 \text{ mm} \quad (5.46)$$

Jelikož je maximální provozní napětí $U_{m2} = 24 \text{ kV}$ větší než $17,5 \text{ kV}$, bude vložen mezi vinutí izolační válec.

Vzdálenost $\delta_{1-2,m}$ se zaokrouhluje na celé mm nahoru:

$$\delta_{1-2,m} = \delta_{1-2,e} - b_{i1,ex} - b_{i2,in} = 42 \text{ mm} \quad (5.47)$$

Mechanický vnitřní průměr $D_{w2,in,m}$ vinutí 2 se vypočítá z hodnoty mechanického vnějšího průměru $D_{w1,ex,m}$ vinutí 1 a vzdáleností $\delta_{1-2,m}$ mezi vinutími 1 a 2:

$$D_{w2,in,m} = D_{w1,ex,m} + 2 \cdot \delta_{1-2,m} = 321 + 2 \cdot 42 = 405 \text{ mm} \quad (5.48)$$

Elektrický vnitřní průměr $D_{w2,in,e}$ je pak:

$$D_{w2,in,e} = D_{w2,in,m} + 2 \cdot b_{i2,in} = 405 + 2 \cdot b_{i2,in} = 411 \text{ mm} \quad (5.49)$$

Mechanický vnější průměr $D_{w2,ex,m}$ se vypočítá:

$$D_{w2,ex,m} = D_{w2,in,m} + 2 \cdot B_{w2,m} = 405 + 2 \cdot 43 = 491 \text{ mm} \quad (5.50)$$

Elektrický vnější průměr $D_{w2,ex,e}$ vinutí 2:

$$D_{w2,ex,e} = D_{w2,ex,m} - 2 \cdot b_{i2,ex} = 491 - 2 \cdot b_{i2,ex} = 485 \text{ mm} \quad (5.51)$$

Mechanická vzdálenost $\delta_{1,m}$ mezi vinutími 2 dvou fází je:

$$\delta_{f,m} = \delta_{f,e} - 2 \cdot b_{i2,ex} = 38 \text{ mm} \quad (5.52)$$

Pro jednotlivá vinutí se vypočítá minimální výška okna $L_{j,wi}$ následovně:

$$L_{j,w1} = H_{w1,e} + \delta_{h1} + \delta_{d1} = 990 + \delta_{h1} + \delta_{d1} = 1030 \text{ mm} \quad (5.53)$$

$$L_{j,w2} = H_{w2,e} + \delta_{h2} + \delta_{d2} = 980 + \delta_{h2} + \delta_{d2} = 1160 \text{ mm} \quad (5.54)$$

Konečná výška jádra magnetického obvodu L_j se určí jako:

$$L_j = \max\{L_{j,w1}; L_{j,w2}\} = \max\{1030; 1160\} = 1160 \text{ mm} \quad (5.55)$$

5.8. Výpočet odporů vinutí

Délka vodiče L_{v1} se určí ze středního elektrického průměru vinutí 1 a počtu závitů N_{z1} :

$$L_{v1} = \pi \cdot \frac{D_{w1,in,e} + D_{w1,ex,e}}{2} \cdot N_{z1} = \pi \cdot \frac{0,2714 + 0,320}{2} \cdot 18 = 16,721 \text{ m} \quad (5.56)$$

Odpor jedné fáze při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ má hodnotu:

$$R_{f1,20^\circ\text{C}} = \rho_{20^\circ\text{C}} \cdot \frac{L_{v1}}{S_{w1}} = 2,941 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{16,721}{1188 \cdot 10^{-6}} = 4,139 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (5.57)$$

Odpor jedné fáze $R_{f1,120^{\circ}\text{C}}$ při teplotě 120°C odpovídající teplotní třídě izolace F se vypočítá:

$$\begin{aligned} R_{f1,120^{\circ}\text{C}} &= R_{f1,20^{\circ}\text{C}} \cdot [1 + (120 - 20) \cdot \alpha] \\ &= 4,139 \cdot 10^{-4} \cdot [1 + (120 - 20) \cdot 0,00370] \\ &= 5,670 \cdot 10^{-4} \Omega \end{aligned} \quad (5.58)$$

Odpor jedné fáze $R_{f2,n,120^{\circ}\text{C}}$ vinutí 2 při zapojením jmenovité odbočky se vypočítá obdobně jako pro vinutí 1:

$$\begin{aligned} L_{v2} &= \pi \cdot \frac{D_{w2,in,e} + D_{w2,ex,e}}{2} \cdot N_{z2,n} \\ &= \pi \cdot \frac{0,411 + 0,485}{2} \cdot 1715 = 2413,748 \text{ m} \end{aligned} \quad (5.59)$$

$$\begin{aligned} R_{f2,n,20^{\circ}\text{C}} &= \varrho_{20^{\circ}\text{C}} \cdot \frac{L_{v2}}{S_{w2}} = 2,941 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2413,748}{12,884 \cdot 10^{-6}} \\ &= 5,510 \Omega \end{aligned} \quad (5.60)$$

$$\begin{aligned} R_{f2,n,120^{\circ}\text{C}} &= R_{f2,n,20^{\circ}\text{C}} \cdot [1 + (120 - 20) \cdot \alpha] \\ &= 5,510 \cdot [1 + (120 - 20) \cdot 0,00370] \\ &= 7,549 \Omega \end{aligned} \quad (5.61)$$

5.9. Výpočet ztrát nakrátko P_{kn}

Váha G_{w1} vinutí 1 je:

$$\begin{aligned} G_{w1} &= m \cdot Y_1 \cdot L_{v1} \cdot S_{w1} = 3 \cdot 2700 \cdot 16,721 \cdot 1188 \cdot 10^{-6} \\ &= 160,903 \text{ kg} \end{aligned} \quad (5.62)$$

Poměrná hodnota c_k souhrnných ztrát $P_{přid}$ bude uvažována pro obě vinutí:

$$c_{k1} = c_{k2} = 1,05 \quad (5.63)$$

Celkové jmenovité ztráty nakrátko P_{k1} vinutí 1 se potom vypočítají přímo z velikosti váhy G_{w1} , měrných ztrát p_{k1} , přídavných ztrát c_{k1} a proudové hustoty σ_1 :

$$\begin{aligned} P_{k1} &= G_{w1} \cdot p_{k1} \cdot c_{k1} \cdot \sigma_1^2 = 160,903 \cdot 14,609 \cdot 1,05 \cdot 1,215^2 \\ &= 3643,565 \text{ W} \end{aligned} \quad (5.64)$$

Jmenovité ztráty nakrátko P_{k2} vinutí 2 se vypočítají obdobně jako pro vinutí 1.

$$\begin{aligned} G_{w2} &= m \cdot Y_2 \cdot L_{v2} \cdot S_{w2} \\ &= 3 \cdot 2700 \cdot 2413,748 \cdot 12,884 \cdot 10^{-6} \\ &= 251,900 \text{ kg} \end{aligned} \quad (5.65)$$

$$\begin{aligned} P_{k2} &= G_{w2} \cdot p_{k2} \cdot c_{k2} \cdot \sigma_2^2 \\ &= 251,900 \cdot 14,609 \cdot 1,05 \cdot 1,176^2 \\ &= 5343,830 \text{ W} \end{aligned} \quad (5.66)$$

Velikost jmenovitých ztrát nakrátko P_{kn} dvouvinuťového transformátoru stanovíme jako součet P_{k1} a P_{k2} :

$$\begin{aligned} P_{kn} &= P_{k1} + P_{k2} + P_{ko} = 3643,565 + 5343,830 + 0 \\ &= 8987,395 \text{ W} \end{aligned} \quad (5.67)$$

Aby návrh splňoval požadavky „Eko-designu“ musí být vypočtené jmenovité ztráty nakrátko P_{kn} pro jmenovitý výkon $S_n = 1000 \text{ kVA}$ menší než 9000 W , což zde splňují.

5.10. Poměrné napětí nakrátko u_k

Reálnou složku u_r napětí nakrátko vypočítáme z velikosti jmenovitých ztrát nakrátko P_{kn} a velikosti jmenovitého výkonu S_n :

$$u_r = \frac{P_{kn}}{S_n} \cdot 100 = \frac{8987,395}{1 \cdot 10^6} \cdot 100 = 0,899 \% \quad (5.68)$$

Výška vinutí H_w se při nestejných výškách $H_{w1,e}$ a $H_{w2,e}$ vypočítá jako jejich aritmetický průměr:

$$H_w = \frac{H_{w2,e} + H_{w1,e}}{2} = \frac{990 + 980}{2} = 985 \text{ mm} \quad (5.69)$$

Hodnota Rogowského činitele k_r je:

$$k_r = 1 - \frac{D_{w2,ex,e} - D_{w1,in,e}}{2 \cdot \pi \cdot H_w} = 1 - \frac{485 - 271,4}{2 \cdot \pi \cdot 985} = 0,9655 \quad (5.70)$$

Vrcholová hodnota rozptylové magnetické indukce B_r mezi vinutími má hodnotu:

$$\begin{aligned} B_r &= \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N_{z1} \cdot I_{nv1} \cdot \sqrt{2} \cdot k_r}{H_w} \\ &= \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 18 \cdot 1443,376 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,9655}{985 \cdot 10^{-3}} \\ &= 45,258 \text{ mT} \end{aligned} \quad (5.71)$$

Pro výpočet plochy S_r , kterou prochází rozptylový tok Ψ_r ve vzduchových cestách, potřebujeme vypočítat redukovanou šířku vinutí δ_r a střední obvod rozptylového toku o_r :

$$\begin{aligned} \delta_r &= \frac{D_{w1,ex,e} - D_{w1,in,e} + D_{w2,ex,e} - D_{w2,in,e}}{6} + \frac{D_{w2,in,e} - D_{w1,ex,e}}{2} \\ &= \frac{320 - 271,4 + 485 - 411}{6} + \frac{411 - 320}{2} \\ &= 65,933 \text{ mm} \end{aligned} \quad (5.72)$$

$$\begin{aligned} o_r &= \pi \cdot \left[D_{w1,in,e} + \delta_r + \frac{2}{3} \cdot (D_{w1,ex,e} - D_{w1,in,e}) \right] = \\ &= \pi \cdot \left[271,4 + 65,933 + \frac{2}{3} \cdot (320 - 271,4) \right] \\ &= 1161,550 \text{ mm} \end{aligned} \quad (5.73)$$

Plocha S_r je dána jejich součinem:

$$\begin{aligned} S_r &= \delta_r \cdot o_r = 65,933 \cdot 10^{-3} \cdot 1161,550 \cdot 10^{-3} \\ &= 76,584 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (5.74)$$

Velikost magnetického rozptylového toku Ψ_r ve vzduchových cestách vypočítáme z velikosti plochy S_r , kterou magnetický rozptylový tok Ψ_r protéká a velikosti vrcholové hodnoty magnetické indukce B_r v prostu mezi vinutími:

$$\begin{aligned} \Psi_r &= B_r \cdot S_r = 45,258 \cdot 10^{-3} \cdot 76,584 \cdot 10^{-3} \\ &= 3,466 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \end{aligned} \quad (5.75)$$

Hlavní magnetický tok Φ_j v průřezu magnetického obvodu vypočítáme jako součin vrcholové hodnoty magnetické indukce B_j v jádře a čistého průřezu železa v jádře S_j :

$$\Phi_j = B_j \cdot S_j = 1,447 \cdot 39921,8 \cdot 10^{-6} = 57,767 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (5.76)$$

Induktivní složku u_x napětí nakrátko vypočítáme ze znalosti velikosti magnetického rozptylového magnetického toku Ψ_r ve vzduchových cestách v prostoru vinutí a velikosti hlavního toku Φ_j v magnetickém obvodu:

$$u_x = \frac{\Psi_r}{\Phi_j} \cdot 100 = \frac{3,466 \cdot 10^{-3}}{57,767 \cdot 10^{-3}} \cdot 100 = 6,000 \% \quad (5.77)$$

Výsledná velikost poměrného napětí nakrátko u_k je:

$$u_k = \sqrt{u_r^2 + u_x^2} = \sqrt{0,899^2 + 6,000^2} = 6,067 \% \quad (5.78)$$

Jelikož zadaný zdánlivý výkon transformátoru $S_n = 1000$ kVA je větší než 630 kVA, doporučená hodnota u_{kd} je 6 % s tolerancí od $0,975 \cdot u_{kd}$ do $1,035 \cdot u_{kd}$:

$$\frac{u_k}{u_{kd}} = \frac{6,067}{6} = 1,011 \quad (5.79)$$

Vypočítaná hodnota u_k leží v dovolených mezích.

5.11. Výpočet ztrát naprázdno P_{on}

Rozteč jader se vypočítá z vnějšího mechanického rozměru $D_{w2,ex,m}$ vinutí 2 a mechanické vzdálenosti $\delta_{f,m}$ mezi sousedními vinutími 2:

$$M_j = D_{w2,ex,m} + \delta_{f,m} = 491 + 38 = 529 \text{ mm} \quad (5.80)$$

Délka spojek L_o se vypočítá jako součet dvojnásobku rozteče jader M_j a průměru D_j :

$$L_o = 2 \cdot M_j + D_j = 2 \cdot 529 + 255 = 1313 \text{ mm} \quad (5.81)$$

Váha spojek G_s se potom vypočítá při měrné váze materiálu plechů $\gamma_{Fe} = 7650$ kg/m³:

$$\begin{aligned} G_s &= 2 \cdot S_j \cdot L_o \cdot \gamma_{Fe} = 2 \cdot 39921,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,313 \cdot 7650 \\ &= 801,985 \text{ kg} \end{aligned} \quad (5.82)$$

Váha jader G_j se vypočítá:

$$\begin{aligned} G_j &= m \cdot S_j \cdot (L_j + 0,0272 \cdot D_j) \cdot \gamma_{Fe} \\ &= 3 \cdot 39921,8 \cdot 10^{-6} \\ &\quad \cdot (1,160 + 0,0272 \cdot 0,255) \cdot 7650 \\ &= 1069,153 \text{ kg} \end{aligned} \quad (5.83)$$

Celková váha magnetického obvodu G_{Fe} se pak určí jako součet váhy jader G_j a váhy spojek G_s :

$$G_{Fe} = G_j + G_s = 1069,153 + 801,985 = 1871,138 \text{ kg} \quad (5.84)$$

Hodnota měrných ztrát naprázdno při zvolené magnetické indukci v jádře a pro zvolený druh plechů má hodnotu $p_o = 0,7678$ W/kg. Součinitel přídavných ztrát naprázdno má pro vypočítané rozměry transformátoru hodnotu $k_{po} = 1,12$. Jmenovité ztráty naprázdno P_{on} tedy jsou:

$$\begin{aligned} P_{on} &= p_o \cdot G_{Fe} \cdot k_{po} = 0,7350 \cdot 1871,138 \cdot 1,12 \\ &= 1540,321 \text{ W} \end{aligned} \quad (5.85)$$

Aby návrh splňoval požadavky „Eko-designu“ musí být jmenovité ztráty naprázdno P_{on} pro jmenovitý výkon $S_n = 1000$ kVA menší než 1550 W. Tento návrh tento požadavek splňuje.

5.12. Výpočet oteplení transformátoru

5.12.1 Oteplení ze ztrát naprázdno

Ztráty naprázdno $P_{j,Fe}$, které se odvedou chladicím povrchem jader, při uvažování koeficientu $k_j = 0,400$ jsou:

$$P_{j,Fe} = k_j \cdot P_{on} = 0,400 \cdot 1540,321 = 616,128 \text{ W} \quad (5.86)$$

Chladicí plocha $S_{ch,j}$ jader magnetického obvodu se stanoví jako plocha m válců o průměru D_j a výšce jádra L_j :

$$S_{ch,j} = m \cdot \pi \cdot D_j \cdot L_j = 3 \cdot \pi \cdot 0,255 \cdot 1,160 = 2,788 \text{ m}^2 \quad (5.87)$$

Tepelné zatížení povrchu jádra q_j se stanoví jako:

$$q_j = \frac{P_{j,Fe}}{S_{ch,j}} = \frac{616,128}{2,788} = 220,993 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (5.88)$$

Součinitel přestupu tepla má hodnotu $\alpha_j = 6,491 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Oteplení povrchu jádra magnetického obvodu $\Delta\vartheta_j$ se vypočítá jako:

$$\Delta\vartheta_j = \frac{q_j}{\alpha_j} = \frac{220,993}{6,491} = 34,046 \text{ K} \quad (5.89)$$

Součinitele pro přepočítání oteplení vnitřního vinutí 1, respektive vnějšího vinutí 2 od ztrát jádra mají hodnoty $k_{j1} = 2,4$ a $k_{j2} = 15$. Oteplení $\Delta\vartheta_{j1}$ vnitřního vinutí 1 a $\Delta\vartheta_{j2}$ vlivem ztrát naprázdno P_{on} jsou:

$$\Delta\vartheta_{j1} = \frac{\Delta\vartheta_j}{k_{j1}} = \frac{34,046}{2,4} = 14,186 \text{ K} \quad (5.90)$$

$$\Delta\vartheta_{j2} = \frac{\Delta\vartheta_j}{k_{j2}} = \frac{34,046}{15} = 2,270 \text{ K} \quad (5.91)$$

5.12.2 Oteplení ze ztrát nakrátko pro vnitřní vinutí 1

Ve vinutí 1 se nevyskytují žádné axiální chladicí kanály. Nejdříve se vypočítá velikost vnitřní $S_{ch,w1,in}$ a vnější $S_{ch,w1,ex}$ chladicí plochy vinutí 1:

$$S_{ch,w1,in} = m \cdot \pi \cdot D_{w1,in,m} \cdot H_{w1,m} = 3 \cdot \pi \cdot 0,271 \cdot 1,020 = 2,605 \text{ m}^2 \quad (5.92)$$

$$S_{ch,w1,ex} = m \cdot \pi \cdot D_{w1,ex,m} \cdot H_{w1,m} = 3 \cdot \pi \cdot 0,320 \cdot 1,020 = 3,076 \text{ m}^2 \quad (5.93)$$

Předběžné tepelné zatížení povrchu q_{p1} vinutí 1 se stanoví jako:

$$q_{p1} = \frac{P_{k1}}{S_{ch,w1,in} + S_{ch,w1,ex}} = \frac{3643,565}{2,605 + 3,076} = 641,360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (5.94)$$

Předběžné hodnoty oteplení vnitřního $\Delta\vartheta_{p1,in}$ a vnějšího $\Delta\vartheta_{p1,ex}$ povrchu se vypočítají pro součinitele přestupu tepla $\alpha_{1,in} = 6,491 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, $\alpha_{1,ex} = 7,710 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$:

$$\Delta\vartheta_{p1,in} = \frac{q_{p1}}{\alpha_{1,in}} = \frac{641,360}{6,491} = 98,808 \text{ K} \quad (5.95)$$

$$\Delta\vartheta_{p1,ex} = \frac{q_{p1}}{\alpha_{1,ex}} = \frac{641,360}{7,710} = 83,185 \text{ K} \quad (5.96)$$

Tepelné zatížení $q_{l,in}$ na vnitřním a $q_{l,ex}$ na vnějším povrchu budou:

$$\begin{aligned} q_{1,in} &= q_{p1} \cdot \frac{2}{\Delta\vartheta_{p1,in} + \Delta\vartheta_{p1,ex}} \cdot \Delta\vartheta_{p1,ex} \\ &= 641,360 \cdot \frac{2}{98,808 + 83,185} \cdot 83,185 \\ &= 586,303 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \end{aligned} \quad (5.97)$$

$$\begin{aligned} q_{1,ex} &= q_{p1} \cdot \frac{2}{\Delta\vartheta_{p1,in} + \Delta\vartheta_{p1,ex}} \cdot \Delta\vartheta_{p1,in} \\ &= 641,360 \cdot \frac{2}{98,808 + 83,185} \cdot 98,808 \\ &= 696,417 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \end{aligned} \quad (5.98)$$

Výsledná hodnota oteplení $\Delta\vartheta_{l,in}$ a $\Delta\vartheta_{l,ex}$ vnitřního a vnějšího povrchu vinutí 1 se vypočítají:

$$\Delta\vartheta_{1,in} = \frac{q_{1,in}}{\alpha_{1,in}} = \frac{586,303}{6,491} = 90,3255 \text{ K} \quad (5.99)$$

$$\Delta\vartheta_{1,ex} = \frac{q_{1,ex}}{\alpha_{1,ex}} = \frac{696,417}{7,710} = 90,3265 \text{ K} \quad (5.100)$$

Střední oteplení povrchu vinutí 1 $\Delta\vartheta_l$ se pak vypočítá:

$$\Delta\vartheta_1 = \frac{\Delta\vartheta_{1,in} + \Delta\vartheta_{1,ex}}{2} = \frac{90,3255 + 90,3265}{2} = 90,3260 \text{ K} \quad (5.101)$$

Tepelná vodivost použitého izolačního materiálu je $\lambda_{i1} = 0,300$. Spád oteplení $\delta\vartheta_{l,in}$ od vnitřního povrchu vinutí 1 směrem dovnitř vinutí 1 se vypočítá:

$$\begin{aligned} \delta\vartheta_{1,in} &= \frac{b_{i1}}{\lambda_{i1}} \cdot N_{z1} \cdot 0,33 \cdot q_{i,in} \\ &= \frac{0,185 \cdot 10^{-3}}{0,300} \cdot 18 \cdot 0,33 \cdot 586,303 \\ &= 2,1476 \text{ K} \end{aligned} \quad (5.102)$$

Spád oteplení $\delta\vartheta_{l,ex}$ od vnějšího povrchu vinutí 1 směrem dovnitř vinutí 1 se vypočítá obdobně:

$$\begin{aligned} \delta\vartheta_{1,ex} &= \frac{b_{i1}}{\lambda_{i1}} \cdot N_{z1} \cdot 0,33 \cdot q_{i,ex} \\ &= \frac{0,185 \cdot 10^{-3}}{0,300} \cdot 18 \cdot 0,33 \cdot 696,417 \\ &= 2,5510 \text{ K} \end{aligned} \quad (5.103)$$

Do výpočtu středního oteplení vinutí 1 se vybere větší z hodnot spádu oteplení:

$$\begin{aligned} \delta\vartheta_1 &= \max\{\delta\vartheta_{1,in}; \delta\vartheta_{1,ex}\} = \max\{2,1476; 2,5510\} \\ &= 2,5510 \text{ K} \end{aligned} \quad (5.104)$$

Střední oteplení $\Delta\vartheta_{w1}$ vinutí 1:

$$\Delta\vartheta_{w1} = \Delta\vartheta_1 + \delta\vartheta_1 = 90,3260 + 2,5510 = 92,877 \text{ K} \quad (5.105)$$

Výsledné oteplení $\Delta\vartheta_{w1+}$ vnitřního vinutí 1 při jmenovitém provozu je:

$$\begin{aligned}
\Delta\vartheta_{w1+} &= \Delta\vartheta_{w1} \cdot \left[1 + \left(\frac{\Delta\vartheta_{j1}}{\Delta\vartheta_{w1}} \right)^{1,25} \right]^{0,80} \\
&= 92,877 \cdot \left[1 + \left(\frac{14,186}{92,877} \right)^{1,25} \right]^{0,80} \\
&= 99,906 \text{ K}
\end{aligned} \tag{5.106}$$

Výsledné oteplení $\Delta\vartheta_{w1+}$ vnitřního vinutí 1 je menší než dovolené oteplení $\Delta\vartheta_d = 100$ K, vinutí tedy splňuje podmínky teplotní třídy F.

5.12.3 Oteplení ze ztrát nakrátko pro vnější vinutí 2

Ve vinutí 2 se také nevyskytují žádné axiální chladicí kanály. Až po výpočet středního oteplení povrchu vinutí $\Delta\vartheta_2$ se postupuje stejně:

$$\begin{aligned}
S_{ch,w2,in} &= m \cdot \pi \cdot D_{w2,in,m} \cdot H_{w2,m} = 3 \cdot \pi \cdot 0,405 \cdot 1,020 \\
&= 3,893 \text{ m}^2
\end{aligned} \tag{5.107}$$

$$\begin{aligned}
S_{ch,w2,ex} &= m \cdot \pi \cdot D_{w2,ex,m} \cdot H_{w2,m} = 3 \cdot \pi \cdot 0,491 \cdot 1,020 \\
&= 4,720 \text{ m}^2
\end{aligned} \tag{5.108}$$

$$\begin{aligned}
q_{p2} &= \frac{P_{k2}}{S_{ch,w2,in} + S_{ch,w2,ex}} = \frac{5343,830}{3,893 + 4,720} \\
&= 620,438 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}
\end{aligned} \tag{5.109}$$

Výsledné hodnoty předběžných oteplení $\Delta\vartheta_{p2,in}$ a $\Delta\vartheta_{p2,ex}$ vnitřního a vnějšího povrchu vinutí 2 se vypočítají pro součinitele přestupu tepla $\alpha_{2,in} = 6,278 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, $\alpha_{2,ex} = 6,166 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$:

$$\Delta\vartheta_{p2,in} = \frac{q_{p2}}{\alpha_{2,in}} = \frac{620,438}{7,488} = 82,858 \text{ K} \tag{5.110}$$

$$\Delta\vartheta_{p2,ex} = \frac{q_{p2}}{\alpha_{1,ex}} = \frac{620,438}{6,166} = 100,622 \text{ K} \tag{5.111}$$

$$\begin{aligned}
q_{2,in} &= q_{p2} \cdot \frac{2}{\Delta\vartheta_{p2,in} + \Delta\vartheta_{p2,ex}} \cdot \Delta\vartheta_{p2,ex} = \\
&= 620,438 \cdot \frac{2}{82,858 + 100,622} \cdot 100,622 \\
&= 680,507 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}
\end{aligned} \tag{5.112}$$

$$\begin{aligned}
q_{2,ex} &= q_{p2} \cdot \frac{2}{\Delta\vartheta_{p2,in} + \Delta\vartheta_{p1,ex}} \cdot \Delta\vartheta_{p2,in} \\
&= 620,438 \cdot \frac{2}{82,858 + 100,622} \cdot 82,858 \\
&= 560,369 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}
\end{aligned} \tag{5.113}$$

$$\Delta\vartheta_{2,in} = \frac{q_{2,in}}{\alpha_{2,in}} = \frac{680,507}{7,488} = 90,8797 \text{ K} \tag{5.114}$$

$$\Delta\vartheta_{2,ex} = \frac{q_{1,ex}}{\alpha_{1,ex}} = \frac{560,369}{6,166} = 90,8805 \text{ K} \tag{5.115}$$

Střední oteplení povrchu vinutí 2 $\Delta\vartheta_2$ se pak vypočítá:

$$\Delta\vartheta_2 = \frac{\Delta\vartheta_{2,in} + \Delta\vartheta_{2,ex}}{2} = \frac{90,8797 + 90,8805}{2} = 90,880 \text{ K} \quad (5.116)$$

Tepelná vodivost izolace bude uvažována stejná jako pro vinutí 1: $\lambda_{i1} = \lambda_{i2} = 0,300$. Spád oteplení $\delta\vartheta_{2,in}$ na vnitřním povrchu na izolaci $b_{i2,in}$ vinutí 2 se vypočítá:

$$\delta\vartheta_{2,in} = \frac{b_{i2,in}}{\lambda_{i2}} \cdot q_{2,in} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{0,300} \cdot 680,507 = 6,805 \text{ K} \quad (5.117)$$

Spád oteplení $\delta\vartheta_{2,ex}$ na vnějším povrchu na izolaci $b_{i2,ex}$ vinutí 2 se vypočítá:

$$\delta\vartheta_{2,ex} = \frac{b_{i2,ex}}{0,300} \cdot q_{2,ex} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{0,300} \cdot 560,369 = 5,604 \text{ K} \quad (5.118)$$

Střední oteplení $\Delta\vartheta_{w2}$ do vnitřku vinutí 2 je:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{w2} &= \Delta\vartheta_2 + \max\{\delta\vartheta_{2,in}; \delta\vartheta_{2,ex}\} \\ &= 90,880 + \max\{6,805; 5,604\} = 97,685 \text{ K} \end{aligned} \quad (5.119)$$

Oteplení vnějšího vinutí 2 při jmenovitém provozu $\Delta\vartheta_{w2+}$ (od ztrát naprázdno P_{on} a nakrátko P_{k2}) bude mít hodnotu:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{w2+} &= \Delta\vartheta_{w2} \cdot \left[1 + \left(\frac{\Delta\vartheta_{j2}}{\Delta\vartheta_{w2}} \right)^{1,25} \right]^{0,80} \\ &= 97,685 \cdot \left[1 + \left(\frac{2,270}{97,685} \right)^{1,25} \right]^{0,80} \\ &= 98,393 \text{ K} \end{aligned} \quad (5.120)$$

Výsledné oteplení $\Delta\vartheta_{w2+}$ vnějšího vinutí 2 je menší než dovolené oteplení $\Delta\vartheta_d = 100$ K a tím pádem vyhovuje teplotní třídě F.

6. POROVNÁNÍ TYPŮ VN VINUTÍ

V této kapitole jsou porovnány tři nejpoužívanější typy VN vinutí suchých výkonových transformátorů (sypané, plynulé a kotoučové vinutí) na základě číselných návrhů podle předešlých dvou kapitol. Pro porovnání byly zvoleny tři výkonové úrovně $S_n = 400$ kVA, 1000 kVA a 1600 kVA. Aby porovnání bylo objektivní, všechny ostatní parametry zadání jsou stejné jako v Tab. 4. Celkem tedy bylo provedeno devět návrhů. Všechny návrhy transformátorů byly provedeny tak, aby splňovaly požadavky „Eko-designu“ a aby jejich výroba bylo co nejlevnější, na základě firemního optimalizačního programu. Proto jako první a nejdůležitější hledisko porovnání je podle konečné výrobní ceny celého transformátoru. Dalším významným hlediskem je porovnání podle činitele plnění VN vinutí, který se používá pro hodnocení zaplnění prostoru vinutí vodivým materiálem.

6.1. Porovnání podle ceny

Zjednodušený výpočet peněžní hodnoty transformátoru se provede jako součet nákladů na materiál magnetického obvodu, NN vinutí, VN vinutí, nákladů za neaktivní části magnetického obvodu, další elektricky aktivní části a také nákladů za montáž a režijní náklady [19]. Pro nedostatek dostupných zdrojů ohledně nákladů za montáž a režii nebudou při výpočtu uvažovány. Jako příklad výpočtu nákladů poslouží již vypočítané hodnoty z předchozí kapitoly pro transformátor se sypaným VN vinutím se zdánlivým výkonem $S_n = 1000$ kVA.

Náklady za materiál se vypočítají jako součin váhy použitého materiálu [kg] a nákladů za kg tohoto materiálu [Kč/kg]. Pro magnetický obvod je to hmotnost plechů G_{Fe} a cena za kg plechů k_{Fe} :

$$K_{Fe} = G_{Fe} \cdot k_{Fe} = 1871,138 \cdot 63,45 = 118724 \text{ Kč} \quad (6.1)$$

Výpočet nákladů za NN vinutí je součet nákladů za vodivou fólii K_{w1} , za izolační fólii a vývody. Cenu posledních dvou součástí můžeme zvolit za konstantní $K_{ost1} = 300$ Kč. Náklady za vodivou fólii jsou součinem váhy vinutí 1 G_{w1} a měrných nákladů za fólii k_{w1} :

$$K_{w1} = G_{w1} \cdot k_{w1} = 160,903 \cdot 200 = 32181 \text{ Kč} \quad (6.2)$$

Při výpočtu ceny VN vinutí budeme počítat s náklady za vodivý drát K_{w2} a za zaléváním izolační hmoty K_{i2} . Náklady za skelnou síť, izolační vlnovec, vývody a ostatní materiál budeme uvažovat fixně $K_{ost2} = 500$ Kč. Náklady za drát se pak vypočtou:

$$\begin{aligned} K_{w2} &= G_{w2} \cdot \frac{N_{z2,cel}}{N_{z2,n}} \cdot k_{w2} = 251,900 \cdot \frac{1801}{1715} \cdot 200 \\ &= 52906 \text{ Kč} \end{aligned} \quad (6.3)$$

Hmotnost izolační hmoty se zjednodušeně vypočítá součinem počtu fází m , hustoty zalévací směsi γ_{i2} a objemu vinutí 2 zmenšený o objem vodiče:

$$\begin{aligned} G_{i2} &= m \cdot \gamma_{i2} \cdot \left[\frac{\pi}{4} (D_{w2,ex,m}^2 - D_{w2,in,m}^2) \cdot H_{w2,m} - L_{v2} \cdot S_{w2} \cdot \frac{N_{z2,cel}}{N_{z2,n}} \right] \\ &= 3 \cdot 1817 \\ &\cdot \left[\frac{\pi}{4} (0,491^2 - 0,405^2) \cdot 1,020 - 2413,748 \cdot 12,884 \right. \\ &\cdot \left. 10^{-6} \cdot \frac{1801}{1715} \right] = 158,471 \text{ kg} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Náklady na zalévací izolační hmotu se vypočítají:

$$K_{i2} = G_{i2} \cdot k_{i2} = 158,471 \cdot 39,25 = 6220 \text{ Kč} \quad (6.5)$$

Neaktivní části magnetického obvodu jsou stlačovací a stahovací desky, podvozek a kolečka. Hmotnost stlačovacích desek $G_{stlač}$ se vypočítá přibližně jako osmnáctina váhy magnetického obvodu:

$$G_{stlač} = \frac{G_{Fe}}{18} = \frac{1871,138}{18} = 103,952 \text{ kg} \quad (6.6)$$

Obdobným způsobem se počítá hmotnost stahovacích desek G_{stah} :

$$G_{stah} = \frac{G_{Fe}}{140} = \frac{1871,138}{140} = 13,365 \text{ kg} \quad (6.7)$$

Náklady za podvozek a kolečka budou opět fixní $K_{pod} = 3000$ Kč. Náklady za neaktivní části magnetického obvodu v celku jsou:

$$\begin{aligned} K_{mag} &= G_{stlač} \cdot k_{Fe} + G_{stah} \cdot k_{Fe} + K_{pod} \\ &= 103,952 \cdot 63,45 + 13,365 \cdot 63,45 + 3000 \\ &= 10444 \text{ Kč} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Mezi elektricky aktivní a ostatní části se řadí válcový izolační cylindr, spojovací tyče pro NN či VN vinutí a podpěry. Jejich cena se v součtu pohybuje kolem $K_{el} = 450$ Kč.

Celkové náklady za jeden transformátor vycházejí následovně:

$$\begin{aligned} K_t &= K_{Fe} + K_{w1} + K_{ost1} + K_{w2} + K_{i2} + K_{ost2} + K_{mag} + K_{el} \\ &= 118724 + 32181 + 300 + 52906 + 6220 \\ &\quad + 500 + 10444 + 450 = 221725 \text{ Kč} \end{aligned} \quad (6.9)$$

Tab. 5 Náklady na výrobu transformátorů s daným typem VN vinutí a zvoleným zdánlivým výkonem S_n

	Sypané vinutí	Plynulé vinutí	Kotoučové vinutí
$S_n = 400$ kVA	155 841 Kč	153 965 Kč	162 123 Kč
$S_n = 1000$ kVA	221 725 Kč	214 627 Kč	220 413 Kč
$S_n = 1600$ kVA	309 959 Kč	301 271 Kč	306 579 Kč

Celkové náklady pro každý navržený transformátor, vypočítané podle předchozího postupu byly vloženy do Tab. 5. Z té je zřejmé, že pro výrobu suchého transformátoru se z hlediska nákladů vyplatí použít plynulého VN vinutí pro každý porovnávaný zdánlivý výkon S_n .

U transformátoru s výkonem $S_n = 400$ kVA je rozdíl mezi plynulým a sypaným vinutím „pouze“ 1876 Kč. Jelikož je sypané vinutí na výrobu znatelně rychlejší, při zahrnutí těchto nákladů by bylo pravděpodobně vhodnější využít tohoto druhu vinutí. Pro výkon $S_n = 400$ kVA je jednoznačně nejdražším řešením z porovnávaných kotoučové vinutí, kde je rozdíl oproti plynulému přes 8000 Kč.

Pro transformátory se zdánlivým výkonem $S_n = 1000$ kVA se jednoznačně vyplatí využít plynulého vinutí, kde je cenový rozdíl oproti ostatním počítaným vinutím již značný. Sypané vinutí je pro tento výkon cenově nejhorší, ale při zahrnutí rychlosti výroby do nákladů by bylo nejspíše výhodnější než kotoučové, které je levnější o 1312 Kč, ale je komplikovanější na navíjení stejně jako vinutí plynulé.

Transformátory s největším počítaným výkonem $S_n = 1600$ kVA mají stejné pořadí výšky nákladů na jejich výrobu jako u předchozího výkonu. Zde se však už jednoznačně sypané vinutí jeví jako nejdražší a tedy nejméně vhodné.

Z toho plyne, že použití sypaného vinutí je vhodné pouze pro transformátory se zdánlivým výkonem do 400 kVA a od této hodnoty nahoru se vyplatí použít plynulé vinutí. Kotoučové vinutí se pro porovnávané transformátory nezdá být vůbec vhodné. Pro širší analýzu by bylo třeba porovnat náklady za transformátory se zdánlivým výkonem větším než 1600 kVA a také pro různé napěťové úrovně, protože porovnání v této práci je pouze pro napěťový převod transformátoru 22/0,4 kV a pro jiné převody může mít porovnání úplně jiné výsledky.

6.2. Porovnání podle činitele plnění VN vinutí

Činitel plnění se vypočítá jako poměr plochy průřezu vodivého materiálu vůči ploše mechanického průřezu vinutí podle [19] (s číselným dosazením hodnot z návrhu pro výkon transformátoru $S_n = 1000$ kVA se sypaným vinutím 2 v 5. kapitole):

$$k_{w2} = \frac{S_{w2} \cdot N_{z2,cel}}{B_{w2,m} \cdot H_{w2,m}} = \frac{12,884 \cdot 1801}{43 \cdot 1020} = 0,529 [-] \quad (6.10)$$

Tab. 6 Činitele plnění pro daný typ VN vinutí a zdánlivý výkon

	Sypané vinutí	Plynulé vinutí	Kotoučové vinutí
$S_n = 400$ kVA	0,449	0,508	0,384
$S_n = 1000$ kVA	0,529	0,653	0,565
$S_n = 1600$ kVA	0,548	0,687	0,630

V Tab. 6 jsou uvedeny činitele plnění pro všechny navržené transformátory vypočtené podle (6.10). Z tabulky je patrné, že rozdíly v hodnotách činitelů plnění při daném výkonu mají velkou spojitost s celkovými náklady počítané v předchozí podkapitole. Porovnání činitelů plnění má úplně stejné pořadí jako porovnání cen. Opět je důležité zmínit, že porovnání je pouze pro napěťový převod 22/0,4 kV a pro jiný převod můžou mít vypočítané činitele plnění jinou hodnotu a stejně tak můžou být jiné rozdíly mezi jednotlivými typy vinutí.

Celkově můžeme říct, že pro každý typ vinutí platí, že čím větší je výkon, tím větší je také činitel plnění. Nejvýraznější nárůst těchto hodnot je zaznamenán u kotoučového vinutí, kde se činitel plnění u 1600 kVA blíží dvojnásobku činitele pro 400 kVA.

Činitel plnění sypaného vinutí se s rostoucím zdánlivým výkonem příliš nezlepšuje a mezi výkony 400 kVA a 1600 kVA narostl pouze o 0,1. Oproti ostatním typům vinutí je to nejmenší zlepšení ve využití vodivého materiálu v průřezu vinutí.

Pro všechny počítané zdánlivé výkony má nejvyšší a tedy nejlepší činitel plnění plynulé vinutí, který dosáhl hodnoty až 0,687.

7. ZÁVĚR

V této bakalářské práci byly shrnuty základní informace o historii transformátorů, jejich významu a využití v praxi, jejich konstrukčním provedení a základní matematicko-fyzikálním popisu principu fungování transformátorů.

Práce se dále zaměřila na suché výkonové transformátory, které jsou dražší a větší než olejové. Pro olejové transformátory je jejich izolační a chladicí médium obrovskou výhodou i zároveň slabinou, protože je olej hořlavá kapalina a při havárii transformátoru vznikají velké finanční i ekologické škody, proto musí být olejové transformátory umístěny v samostatném požárním úseku. Díky tomu, že suché transformátory neobsahují žádné tekuté médium, jsou obtížně zápalné a samozhášivé na rozdíl od olejových. Z bezpečnostních důvodů mají suché transformátory dominantní postavení např. ve větrných a vodních elektrárnách, přepravních lodích, metru, automobilovém průmyslu a jiných výrobních halách. V této práci je detailně popsáno z jakých částí se suchý transformátor skládá a jaké technologie se používají pro jejich výrobu a jak probíhá proces jejich výroby a montáže.

Výstupem práce je pak rozbor a porovnání používaných technologií vinutí vysokého napětí, neboť při uvažování stejného výkonu a také napětí, rozměry a náklady na výrobu celého transformátoru určuje hlavně zalité vinutí vyššího napětí a jeho rozměry určuje právě typ technologie vinutí.

Porovnání typů vinutí je provedeno na základě číselných návrhů. V práci je uvedený celý postup návrhu suchých výkonových transformátorů (kapitola 5) a také příklad výpočtu jednoho z porovnávaných transformátorů s číselným dosazením (kapitola 6). Při návrhu jsou zohledněny požadavky EU na tzv. „Eko-design“, kdy je nutné dodržet mezní hodnoty jmenovitých ztrát nakrátko P_{kn} a jmenovitých ztrát naprázdno P_o . Dále je velkým omezujícím faktorem maximální dovolené oteplení $\Delta\theta_d$ při jmenovitém provozu a požadované poměrné napětí nakrátko u_k . Návrhy byly provedeny pro tři nejpoužívanější typy vinutí, konkrétně pro sypané, plynulé (dvojdeskové) a kotoučové (deskové) vinutí. A porovnávány byly pro tři hodnoty zdánlivých výkonů S_n : 400, 1000, 1600 kVA. Celkem tedy bylo provedeno devět návrhů. Pro porovnání byly zvoleny dvě hodnotící kritéria: výrobní cena celého transformátoru a činitel plnění vinutí vyššího napětí.

Při porovnání výrobních nákladů transformátorů vyšel jako nejvhodnější typ plynulé vinutí. Pro výkon 400 kVA by se však stále vyplatilo použít sypané vinutí kvůli výrobní rychlosti. Pro větší výkony je jednoznačně nejvýhodnější z hlediska nákladů zvolit plynulé vinutí. Kotoučové vinutí se pro všechny porovnávané výkony jeví jako ta horší volba, ale je otázka jaké by bylo porovnání pro mnohem vyšší výkony.

Při porovnání vyplnění prostoru vinutí vodičem se zjistila velká spojitost s cenou za náklady za celý transformátor, neboť mají stejné výsledné pořadí podle porovnání s podobnými poměry. Největší činitel plnění byl dosažen pro výkon 1600 kVA s hodnotou 0,687. Důležité je zmínit, že všechna porovnání byla provedena pro stejný napěťový převod transformátoru 22/0,4 kV v zapojení Dy1. Pro jiné vstupní parametry návrhu by porovnání mohlo mít úplně jiné výsledky.

Literatura

- [1] Elektro bastlárna. *Elektro bystlárna* [online]. Česká republika: Burzi, 2004 [cit. 2018-10-10]. Dostupné z: <http://www.ebastlarna.cz/modules.php?name=News&file=article&sid=119>
- [2] Transformer. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2018 [cit. 2018-10-27]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Transformer>
- [3] PETROV, Georgij N. *Elektrické stroje 1: Úvod - Transformátory*. 1. Praha: Academia nakladatelství Československé akademie věd, 1980. ISBN 21-045-80.
- [4] BAŠTA, Jan, Imrich MAYER a Jaroslav CHLÁDEK. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1968. Řada elektrotechnické literatury.
- [5] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Elektrické stroje*. Brno, 1994. Skriptum. VUT Brno FE.
- [6] Transformátor – základní vlastnosti a dělení. *OEnergetice* [online]. Česká republika: OM Solutions s.r.o., 2018 [cit. 2018-10-27]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/transformator-zakladni-vlastnosti-a-deleni/>
- [7] 3 Phase Cylindrical Transformer. *ElectroMagneticWorks* [online]. Kanada: ElectroMagneticWorks, 2018 [cit. 2018-10-25]. Dostupné z: <https://www.emworks.com/application/3-phase-cylindrical-transformer>
- [8] STÝSKALA, Vítězslav. *Transformátory*. Ostrava, 1998. Skriptum. VŠB - TU Ostrava.
- [9] Principle Of Operation Of An Ideal Transformer. *Mini Physics* [online]. USA: Mini Physics, 2018 [cit. 2018-10-27]. Dostupné z: <https://www.miniphysics.com/principle-of-operation-of-ideal.html>
- [10] *Transformátory*. Brno, Sběrka příkladů. VUT Brno FEKT.
- [11] *Elpro-Energo s.r.o.* [online]. Praha, 2018 [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <http://www.elpro-energo.cz/>
- [12] *Heinrich Georg GmbH Maschinenfabrik* [online]. Německo, 2018 [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <https://www.georg.com/international/en/heinrich-georg-gmbh-maschinenfabrik/>
- [13] Step Lap Core. *Indiamart* [online]. Indie, 1996-2018 [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/step-lap-core-13287913288.html>
- [14] *POWERCORE INDUSTRIES INDIA PRIVATE LIMITED* [online]. Indie, 2018 [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <http://www.powercores.com/>

- [15] Duo Core. *AEM Unicore* [online]. 95B Bedford Street, Gillman, South Austrálie 5013, Austrálie, 2018 [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <https://www.aemcores.com.au/technology/unicore/duocore/>
- [16] *Huntsman International LLC* [online]. USA, 2001-2018 [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <https://www.huntsman.com/corporate/a/Home>
- [17] ČSN EN 60076-1, *Výkonové transformátory - Část 1: Obecně: Příloha A*. Praha: Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [18] ČSN EN 60076-11, *Výkonové transformátory - Část 11: Suché transformátory*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [19] STUČHL, Pavel. *Návrh vzduchového transformátoru*. Plzeň, 2018.
- [20] ČSN EN 60076-5, *Výkonové transformátory - Část 1: Zkratová odolnost. 2*. Praha: Český normalizační institut, 2007.

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

ABB	...	Asea Brown Boveri
AF	...	nucené chlazení
AN	...	přirozené chlazení
ČKD	...	Českomoravská-Kolben-Daněk
D, d	...	zapojení do trojúhelníku
EU	...	Evropská unie
GmbH	...	Gesellschaft mit beschränkter Haftung (společnost s ručením omezeným)
IT	...	ideální transformátor
LLC	...	Limited liability company (společnost s ručením omezeným)
NN	...	nižší napětí
SGB	...	Starkstrom-Gerätebau GmbH
VN	...	vyšší napětí
Y, y	...	zapojení do hvězdy

Symboly:

$\Delta\vartheta_{1,ex}$	...	oteplení vnějšího povrchu vinutí 1	[K]
$\Delta\vartheta_{1,in}$	...	oteplení vnitřního povrchu vinutí 1	[K]
$\Delta\vartheta_{2,ex}$	...	oteplení vnějšího povrchu vinutí 2	[K]
$\Delta\vartheta_{2,in}$	...	oteplení vnitřního povrchu vinutí 2	[K]
$\Delta\vartheta_d$	...	dovolená hodnota oteplení vinutí	[K]
$\Delta\vartheta_j$	...	oteplení jádra magnetického obvodu	[K]
$\Delta\vartheta_{j1}$	...	oteplení vinutí 1 vlivem ztrát naprázdno	[K]
$\Delta\vartheta_{j2}$	...	oteplení vinutí 2 vlivem ztrát naprázdno	[K]
$\Delta\vartheta_{p1,ex}$	...	předběžné oteplení vnějšího povrchu vinutí 1	[K]
$\Delta\vartheta_{p1,in}$	...	předběžné oteplení vnitřního povrchu vinutí 1	[K]
$\Delta\vartheta_{p2,ex}$	...	předběžné oteplení vnějšího povrchu vinutí 2	[K]
$\Delta\vartheta_{p2,in}$	...	předběžné oteplení vnitřního povrchu vinutí 2	[K]
$\Delta\vartheta_{w1}$	...	střední oteplení vinutí 1 vlivem ztrát nakrátko	[K]
$\Delta\vartheta_{w1+}$	...	výsledné oteplení vinutí 1	[K]
$\Delta\vartheta_{w2}$	...	střední oteplení vinutí 2 vlivem ztrát nakrátko	[K]
$\Delta\vartheta_{w2+}$	...	výsledné oteplení vinutí 2	[K]
AC	...	izolační hladiny – střídavé napětí	[V]
B	...	magnetická indukce	[T]
B	...	šířka	[m]
b_{i1}	...	tloušťka mezizávitové izolace vinutí 1	[m]

$b_{i1,ex}$	... šířku izolace na vnějším průměru vinutí 1	[m]
$b_{i1,in}$	... šířku izolace na vnitřním průměru vinutí 1	[m]
b_{i2}	... oboustranný izolační přírůstek na šířce vodiče	[m]
$b_{i2,ex}$	... tloušťka vnější izolace na vnějším průměru vinutí 2	[m]
$b_{i2,in}$	... tloušťka vnější izolace na vnitřním průměru vinutí 2	[m]
B_j	... magnetická indukce v jádře	[T]
B_{max}	... amplituda magnetické indukce	[T]
B_{pod}	... podélné rozptylové magnetické pole	[T]
$B_{příč}$	... příčné rozptylové magnetické pole	[T]
B_{rms}	... efektivní hodnota magnetické indukce	[T]
b_{v1}	... šířka fóliového vinutí 1	[m]
$b_{v2,e}$	... elektrická šířka profilového vodiče 2	[m]
$b_{v2,m}$	... mechanická šířka profilového vodiče 2	[m]
$B_{w1,e}$	... elektrická šířka vinutí 1	[m]
$B_{w1,m}$	... mechanická šířka vinutí 1	[m]
$B_{w2,e}$	... elektrická šířka vinutí 2	[m]
$B_{w2,m}$	... mechanická šířka vinutí 2	[m]
C	... kapacita	[F]
c_k	... poměrná hodnota souhrnných přídavných ztrát	[-]
D_j	... zvolený průměr kružnice opsané průřezu jádra	[m]
$D_{j,dop}$	... doporučená velikost průměru kružnice opsané průřezu jádra	[mm]
dl	... element délky	[m]
$d_{v2,e}$	... průměr holého vodiče sypaného vinutí 2	[m]
$d_{v2,m}$	... mechanický průměr vodiče sypaného vinutí 2	[m]
$D_{w1,ex,e}$	... mechanický vnější průměr vinutí 1	[m]
$D_{w1,ex,m}$	... elektrický vnější průměr vinutí 1	[m]
$D_{w1,in,e}$	... elektrický vnitřní průměr vinutí 1	[m]
$D_{w1,in,m}$	... mechanický vnitřní průměr vinutí 1	[m]
$D_{w2,ex,e}$	... mechanický vnější průměr vinutí 2	[m]
$D_{w2,ex,m}$	... elektrický vnější průměr vinutí 2	[m]
$D_{w2,in,e}$	... elektrický vnitřní průměr vinutí 2	[m]
$D_{w2,in,m}$	... mechanický vnitřní průměr vinutí 2	[m]
ED	... Eco-design	[-]
E_i	... intenzita elektrického pole namáhání izolace vodiče	[V·m ⁻¹]
f	... frekvence	[Hz]
f	... frekvence přemagnetování	[Hz]
f_2	... rozdíl mezi elektrickými výškami vinutí 1 a 2	[m]
f_n	... jmenovitý kmitočet	[Hz]

G_{Fe}	... váha magnetického obvodu	[kg]
G_{i2}	... hmotnost zalévací směsi ve vinutí 2	[kg]
G_j	... váha jader	[kg]
G_{NN}	... skupina spojení strany nižšího napětí	[-]
G_s	... váha spojek	[kg]
G_{stah}	... hmotnost stahovacích desek	[kg]
$G_{stlač}$	... hmotnost stlačovacích desek	[kg]
G_{VN}	... skupina spojení strany vyššího napětí	[-]
G_{w1}	... váha vinutí 1	[kg]
G_{w2}	... váha vinutí 2	[kg]
H	... výška	[m]
H	... intenzita magnetického pole	[A·m ⁻¹]
$h_{2,sp}$	... axiální výška mezery mezi deskami vinutí 2	[m]
$H\check{C}$	... hodinové číslo	[-]
h_{i1}	... přesah izolace na koncích vinutí 1	[m]
$h_{i2,d}$	... dolní přírůstek izolace na konci vinutí 2	[m]
$h_{i2,h}$	... horní přírůstek izolace na konci vinutí 2	[m]
H_{stup}	... velikost stupňů jádra	[m]
h_{v1}	... výška fóliového vinutí 1	[m]
$h_{v2,dm}$	... mechanická výška připadající na axiální výšku jedné desky vinutí 2	[m]
$h_{v2,e}$	... elektrická výška profilového vodiče 2	[m]
$h_{v2,m}$	... mechanická výška profilového vodiče 2	[m]
H_w	... střední výška vinutí	[m]
$H_{w1,e}$	... elektrická výška vinutí 1	[m]
$H_{w1,m}$	... mechanická výška vinutí 1	[m]
$H_{w2,ax}$	... velikost axiální mezery uprostřed vinutí 2	[m]
$H_{w2,e}$	... elektrická výška vinutí 2	[m]
$H_{w2,er}$	... axiální rozměr prostoru pro navíjení vinutí 2	[m]
$H_{w2,m}$	... mechanická výška vinutí 2	[m]
CH	... způsob chlazení	[-]
I	... proud	[A]
I	... efektivní hodnota proudu harmonického průběhu	[A]
I_0	... fázor proudu příčné větve	[A]
i_1	... okamžitá hodnota proudu na vstupní straně	[A]
I_1	... fázor proudu na vstupní straně	[A]
i_{I0}	... okamžitá hodnota primárního proudu naprázdno	[A]
I_{I0}	... fázor primárního proudu naprázdno	[A]
i_2	... okamžitá hodnota proudu na výstupní straně	[A]

I_2	... fázor proudu na výstupní straně	[A]
$i_{2,ax}$	... minimální elektrická mezera, oboustranný přírůstek izolace mezi propojkou a sousední deskou	[m]
I_{Fe}	... fázor proudu tvořícího ztráty v jádře	[A]
I_m	... fázor magnetizačního proudu	[A]
I_{np1}	... primární proud tekoucí v přípojnicích	[A]
I_{np2}	... sekundární proud tekoucí v přípojnicích	[A]
I_{nv1}	... primární proud tekoucí vinutím	[A]
I_{nv2}	... sekundární proud tekoucí vinutím	[A]
I_o	... magnetizační proud	[A]
i_{v2}	... oboustranný izolační přírůstek vodiče 2	[m]
k	... činitel vazby	[-]
k	... číslo odbočky	[-]
K_{el}	... náklady za elektricky aktivní a ostatní části	[Kč]
k_{Fe}	... cena za kilogram plechů	[Kč·kg ⁻¹]
K_{Fe}	... náklady za magnetický obvod	[Kč]
K_{i2}	... náklady za zalévací směs ve vinutí 2	[Kč]
k_{i2}	... cena za kilogram zalévací směsi ve vinutí 2	[Kč·kg ⁻¹]
k_j	... koeficient podílu ztrát naprázdno chlazených povrchem jádra	[-]
k_{j1}	... součinitel přepočtu oteplení vnitřního vinutí 1	[-]
k_{j2}	... součinitel přepočtu oteplení vnějšího vinutí 2	[-]
K_{ost1}	... náklady za izolační fólii a vývody	[Kč]
K_{ost2}	... náklady za skelnou síť, izolační vlnovec, vývody a ostatní materiál vinutí 2	[Kč]
$k_{p,Fe}$	... koeficientu plnění magnetického obvodu	[-]
$k_{p,s}$	... koeficient plnění sypaného vinutí	[-]
k_{po}	... součinitel přídavných ztrát naprázdno	[-]
K_{pod}	... náklady za podvozek a kolečka	[Kč]
k_r	... Rogowského činitel	[-]
K_t	... náklady za jeden transformátor	[Kč]
k_{w1}	... cena za kilogram vodiče vinutí 1	[Kč·kg ⁻¹]
K_{w1}	... náklady za vodivou folii vinutí 1	[Kč]
k_{w2}	... cena za kilogram vodiče vinutí 2	[Kč·kg ⁻¹]
K_{w2}	... náklady za vodič ve vinutí 2	[Kč]
k_{w2}	... činitel plnění vinutí 2	[-]
L	... indukčnost	[H]
LI	... izolační hladiny – impulsní napětí	[V]
L_j	... výška okna magnetického obvodu	[m]
$L_{j,w1}$	... minimální výška okna pro vinutí 1	[m]

$L_{j,w2}$	... minimální výška okna pro vinutí 2	[m]
L_o	... délka spojek	[m]
L_{r1}	... rozptylová indukčnost primárního vinutí	[H]
L_{r2}	... rozptylová indukčnost sekundárního vinutí	[H]
L_{v1}	... délka vodiče vinutí 1	[m]
L_{v2}	... délka vodiče vinutí 2	[m]
LWA	... hladina hluku, akustický výkon	[dB(A)]
m	... počet fází	[-]
M_j	... rozteč jader	[m]
N	... počet závitů	[-]
N_1	... počet závitů na primární straně	[-]
N_2	... počet závitů na sekundární straně	[-]
$n_{d2,cel}$	... celkový počet desek vinutí 2	[-]
$n_{d2,neod}$	... počet desek neodbočkové části vinutí 2	[-]
$n_{d2,pln}$	... počet desek s neredukovaným počtem závitů vinutí 2	[-]
$n_{d2,red}$	... počet desek s redukováním počtem závitů vinutí 2	[-]
n_{odb}	... počet odboček strany vyššího napětí	[-]
n_{stup}	... počet stupňů odstupňovaného průřezu jádra	[-]
N_{z1}	... počet závitů na straně vinutí 1	[-]
$N_{z2,cel}$	... celkový počet závitů na straně vinutí 2	[-]
$N_{z2,k}$	... počet závitů na k -té odbočce vinutí 2	[-]
$N_{z2,n}$	... jmenovitý počet závitů na straně vinutí 2	[-]
$N_{z2,od}$	... počet závitů v jedné desce odbočkové části vinutí 2	[-]
$N_{z2,pln}$	... počet závitů v neredukovaných deskách neodbočkové části vinutí 2	[-]
$N_{z2,red}$	... počet závitů v redukování deskách neodbočkové části vinutí 2	[-]
o_r	... střední obvod rozptylového magnetického toku	[m]
p	... okamžitá hodnota celkového výkonu	[W]
p_1	... okamžitá hodnota výkonu na vstupu	[W]
p_2	... okamžitá hodnota výkonu na výstupu	[W]
$P_{j,Fe}$	... ztráty naprázdno, které se odvedou chladicím povrchem jader	[W]
p_k	... měrné ztráty materiálu vinutí při 120° C	[W·kg ⁻¹]
P_{k1}	... jmenovité ztráty nakrátko ve vinutí 1	[W]
P_{k2}	... jmenovité ztráty nakrátko ve vinutí 2	[W]
P_{kn}	... jmenovité ztráty nakrátko	[W]
P_{ko}	... ztráty nakrátko v konstrukčních částech	[W]
P_o	... ztráty naprázdno	[W]
p_o	... měrné ztráty naprázdno	[W·kg ⁻¹]

P_{oe}	... ztráty způsobené vířivými proudy	[W]
p_{oe}	... měrné ztráty vířivými proudy	[W·kg ⁻¹]
P_{oh}	... hysterezní ztráty	[W]
p_{oh}	... měrné hysterezní ztráty	[W·kg ⁻¹]
P_{ohm}	... ohmické ztráty ve vinutí při referenční teplotě	[W]
P_{on}	... jmenovité ztráty naprázdno	[W]
P_{pod}	... přídavné ztráty nakrátko způsobené podélným rozptylovým magnetickým polem	[W]
$P_{příč}$	... přídavné ztráty nakrátko způsobené příčným rozptylovým magnetickým polem	[W]
$P_{příd}$	... souhrnné přídavné ztráty nakrátko vinutí 1	[W]
P_{vyv}	... ohmické ztráty ve vývodech z vinutí	[W]
$q_{1,ex}$	... tepelné zatížení na vnějším povrchu vinutí 1	[W·m ⁻²]
$q_{1,in}$	... tepelné zatížení na vnitřním povrchu vinutí 1	[W·m ⁻²]
$q_{2,ex}$	... tepelné zatížení na vnějším povrchu vinutí 2	[W·m ⁻²]
$q_{2,in}$	... tepelné zatížení na vnitřním povrchu vinutí 2	[W·m ⁻²]
q_j	... tepelné zatížení povrchu jádra	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
q_{p1}	... předběžné tepelné zatížení povrchu vinutí 1	[W·m ⁻²]
q_{p2}	... předběžné tepelné zatížení povrchu vinutí 2	[W·m ⁻²]
R	... odpor	[Ω]
R_1	... odpor primárního vinutí	[Ω]
R_2	... odpor sekundárního vinutí	[Ω]
$R_{f1,120°C}$	... odpor jedné fáze vinutí 1 při teplotě 120° C	[Ω]
$R_{f1,20°C}$	... odpor jedné fáze vinutí 1 při teplotě 20° C	[Ω]
$R_{f2,120°C}$	... odpor jedné fáze vinutí 2 při teplotě 120° C	[Ω]
$R_{f2,20°C}$	... odpor jedné fáze vinutí 2 při teplotě 20° C	[Ω]
R_{Fe}	... odpor vyjadřující ztráty v jádře	[Ω]
R_m	... magnetický odpor	[H ⁻¹]
ro	... rozsah odboček	[%]
$ro-$	... rozsah minusových odboček strany vyššího napětí	[%]
$ro+$	... rozsah plusových odboček strany vyššího napětí	[%]
$r_{v2,e}$	... poloměr zaoblení na hraně vodiče 2	[m]
$S_{ch,j}$	... chladičí plocha jader	[m ²]
$S_{ch,w1,ex}$	... vnější chladičí plocha vinutí 1	[m ²]
$S_{ch,w1,in}$	... vnitřní chladičí plocha vinutí 1	[m ²]
$S_{ch,w2,ex}$	... vnější chladičí plocha vinutí 2	[m ²]
$S_{ch,w2,in}$	... vnitřní chladičí plocha vinutí 2	[m ²]
S_n	... jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru	[VA]
S_r	... plocha, kterou prochází rozptylový magnetický tok	[m ²]
S_{v1}	... průřez vodiče ve vinutí 1	[m ²]

S_{v2}	... průřez vodiče ve vinutí 2	[m ²]
$S_{v2,i}$	... Průřez izolovaného kruhového vodiče vinutí 2	[m ²]
S_{w1}	... průřez vinutí 1	[m ²]
S_{w2}	... průřez vinutí 2	[m ²]
$S_{w2,H,B}$	... celkový průřez oblasti vinutí 2	[m ²]
t	... čas	[s]
$t_{2,sp}$	... tloušťka holé propojovací spojky mezi deskami vinutí 2	[m]
TI	... třída izolace	[-]
T_{plech}	... tloušťka plechů	[m]
U_1	... fázor napětí na vstupní straně	[V]
$U_1', I_1', X_1', R_1', L_1', C_1'$	... parametry primárního vinutí přepočítané na počet závitů sekundárního vinutí	[V, A, Ω, Ω, H, F]
U_2	... fázor napětí na výstupní straně	[V]
$U_2', I_2', X_2', R_2', L_2', C_2'$	... parametry sekundárního vinutí přepočítané na počet závitů primárního vinutí	[V, A, Ω, Ω, H, F]
u_{i1}	... okamžitá hodnota indukovaného napětí na vstupu	[V]
U_{i1}	... efektivní hodnota indukovaného napětí na vstupu	[V]
U_{i1}	... fázor indukovaného napětí na vstupu	[V]
u_{i2}	... okamžitá hodnota indukovaného napětí na výstupu	[V]
u_k	... komplexní napětí nakrátko	[%]
u_{kn}	... jmenovité napětí nakrátko	[%]
U_m	... nejvyšší provozní napětí	[V]
U_{max}	... amplituda napětí	[V]
U_{md2}	... napětí v nejkritičtějších místě mezi sousedními deskami vinutí 2	[V]
U_{n1}	... jmenovité napětí primární strany	[V]
U_{n2}	... jmenovité napětí sekundární strany	[V]
U_{nf1}	... primární jmenovité fázové napětí	[V]
U_{nf2}	... sekundární jmenovité fázové napětí	[V]
U_{ns1}	... primární sdružené fázové napětí	[V]
U_{ns2}	... sekundární sdružené fázové napětí	[V]
u_r	... reálná složka napětí nakrátko	[%]
u_x	... imaginární složka napětí nakrátko	[%]
x	... exponent hysterezních ztrát	[-]
X_m	... hlavní magnetizační reaktance	[Ω]
X_{r1}	... rozptylová reaktance primárního vinutí	[Ω]
X_{r2}	... rozptylová reaktance sekundárního vinutí	[Ω]
Z	... fázor impedance zátěže	[Ω]

α	... fázové posunutí	[rad]
α	... teplotní koeficient materiálu	[-]
$\alpha_{1,ex}$	... součinitel přestupu tepla vnějšího povrchu vinutí 1	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
$\alpha_{1,in}$	... součinitel přestupu tepla vnitřního povrchu vinutí 1	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
$\alpha_{2,ex}$	... součinitel přestupu tepla vnějšího povrchu vinutí 2	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
$\alpha_{2,in}$	... součinitel přestupu tepla vnitřního povrchu vinutí 2	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
$\delta_{1-2,e}$	... minimální elektrická vzdálenost mezi vinutími 1 a 2	[m]
$\delta_{1-2,m}$	... minimální mechanická vzdálenost mezi vinutími 1 a 2	[m]
δ_{d1}, δ_{d2}	... minimální elektrické vzdálenosti dolních konců vinutí	[m]
$\delta_{f,e}$	... minimální elektrická vzdálenost mezi vinutími 2 vedlejších fází	[m]
$\delta_{f,m}$	... minimální mechanická vzdálenost mezi vinutími 2 vedlejších fází	[m]
δ_{h1}, δ_{h2}	... minimální elektrické vzdálenosti horních konců vinutí	[m]
δ_{j-1}	... minimální elektrická (i mechanická) vzdálenost mezi jádrem a vnitřním vinutím 1	[m]
δ_r	... redukováná šířka vinutí	[m]
$\delta\vartheta_{1,ex}$	... spád oteplení od vnějšího povrchu vinutí 1	[K]
$\delta\vartheta_{1,in}$	... spád oteplení od vnitřního povrchu vinutí 1	[K]
$\delta\vartheta_{2,ex}$	... spád oteplení na vnějším povrchu izolace vinutí 2	[K]
$\delta\vartheta_{2,in}$	... spád oteplení na vnitřním povrchu izolace vinutí 2	[K]
η	... součinitel hysterezních ztrát	[-]
λ	... tepelná vodivost	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
λ_{i1}	... tepelná vodivost izolačního materiálu vinutí 1	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
λ_{i2}	... tepelná vodivost izolačního materiálu vinutí 2	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
μ_0	... permeabilita vakua	$[\text{H} \cdot \text{m}^{-1}]$
μ_r	... relativní permeabilita	[-]
$\varrho_{20^\circ\text{C}}$	... měrný odpor materiálu při 20° C	$[\Omega \cdot \text{m}]$
σ_1	... proudová hustota vinutí 1	$[\text{A} \cdot \text{m}^{-2}]$
σ_2	... proudová hustota vinutí 2	$[\text{A} \cdot \text{m}^{-2}]$
σ_{Al}	... doporučená proudová hustota hliníku	$[\text{A} \cdot \text{m}^{-2}]$
σ_{Cu}	... doporučená proudová hustota mědi	$[\text{A} \cdot \text{m}^{-2}]$
γ	... hustota materiálu vinutí	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
γ_{Fe}	... měrná váha materiálu plechů	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
γ_{i2}	... hustota zalévací směsi ve vinutí 2	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
Φ	... magnetický tok	[Wb]
Φ_h	... hlavní magnetický tok	[Wb]
Φ_h	... fázor hlavního magnetického toku	[Wb]
Φ_j	... hlavní magnetický tok v magnetickém obvodu	[Wb]
Φ_{max}	... amplituda magnetického toku	[Wb]

Ψ_1	... spřažený magnetický tok na primární straně	[Wb]
Ψ_2	... spřažený magnetický tok na sekundární straně	[Wb]
Ψ_r	... rozptylový magnetický tok	[Wb]
Ψ_{r1}	... rozptylový magnetický tok na primární straně	[Wb]
ω	... úhlová frekvence	[rad·s ⁻¹]