

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2021

Bc. Miroslav Mrajca



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

NÁVRH OLEJOVÉHO DISTRIBUČNÍHO TRANSFORMÁTORU

DESIGN OF OIL DISTRIBUTION TRANSFORMER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Miroslav Mrajca

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

BRNO 2021



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Miroslav Mrajca

ID: 195393

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Návrh olejového distribučního transformátoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte literární rešerši dané problematiky.
2. Proveďte analýzu výroby jádra, vinutí a nádoby, včetně celkové montáže olejového distribučního transformátoru.
3. Popište postup návrhu a výpočtu aktivní části a nádoby olejového distribučního transformátoru.
4. Proveďte číselný výpočet distribučního olejového transformátoru 22/0,4 kV, S = 630 kVA, uk = 4%. Dodržte požadavky na dovolené ztráty na EcoDesign podle směrnice EU 2009/125/ES.
5. Proveďte optimalizaci na minimální výrobní náklady při dodržení směrnice na EcoDesign podle směrnice EU 2009/125/ES.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

PETROV, Georgij N. Elektrické stroje 1: Úvod - Transformátory. 1. Praha: Academia nakladatelství Československé akademie věd, 1980. ISBN 21-045-80.

BAŠTA, Jan, Imrich MAYER a Jaroslav CHLÁDEK. Teorie elektrických strojů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1968. Řada elektrotechnické literatury.

FTZGERALD, A.E., KINGSLEY, CH., UMANS, S.D.: Electric Machinery McGraw-Hill 2003

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

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

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 diplomová práce se zabývá výrobním procesem olejových distribučních transformátorů. Nejprve se věnuje konstrukčnímu uspořádání magnetického obvodu a technologii jeho výroby. Podrobně je rozebrán postup vysekávání plechů jádra a jejich skládání. Následně práce popisuje technologie použité pro výrobu primárního i sekundárního vinutí včetně postupu na navíjecích strojích. Poté se věnuje výrobě nádoby a konečné montáži transformátoru do jednoho celku. V další části práce je rozebrán postup návrhu zadaného distribučního olejového transformátoru i s číselným výpočet, a to při respektování normou daných požadavků. Na závěr je provedeno určení nákladů za materiál navrženého transformátoru.

Klíčová slova

Olejový distribuční transformátor, výroba, jádro, vinutí, nádoba, návrh, výpočet, náklady

Abstract

This master thesis deals with the manufacturing process of oil distribution transformers. Firstly, the thesis devotes to the design arrangement of the magnetic circuit and its manufacturing technology. The procedure of cutting laminations for core and their building into the core. Subsequently, the thesis describes technologies used for manufacturing primary and secondary windings including procedures on winding machines. Then it deals with the production of the tank and the final assembly of the transformer into one unit. The next part of the thesis discusses the design procedure of the assigned distribution oil transformer with a numerical calculation while respecting the requirements of the standards. Finally, the costs of the material of the designed transformer are determined.

Keywords

Oil distribution transformer, manufacturing, core, winding, tank, design, calculation, costs

Bibliografická citace

MRAJCA, Miroslav. *Návrh olejového distribučního transformátoru*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133160>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Bc. Miroslav Mrajca</i>
VUT ID studenta:	<i>195393</i>
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	<i>2020/21</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Návrh olejového distribučního transformátoru</i>

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

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a 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: 18. května 2021

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu doc. Ing. Čestmíru Ondruškovi, 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 děkuji odborným konzultantům Ing. Pavlu Stuchlovi, Ing. Ondřeji Walicovi, Ing. Janu Šlosárkovi a Janu Czernekovi za pomoc a drahocenné rady při psaní dílčích částí práce.

V Brně dne: 18. května 2021

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	11
ÚVOD	12
1. ÚVOD DO VÝROBY OLEJOVÝCH DISTRIBUČNÍCH TRANSFORMÁTORŮ	13
2. VÝROBA JÁDRA	15
2.1 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ MAGNETICKÉHO OBVODU.....	17
2.2 DĚLENÍ JADER Z HLEDISKA SKLÁDÁNÍ PLECHŮ	20
2.2.1 <i>Spoj s úhlem hrany 90° a 45°</i>	20
2.2.2 <i>Spoj natupo, non step-lap, step-lap</i>	21
2.2.3 <i>Přínos step-lapu oproti non step-lapu</i>	22
2.3 PROCES VYSEKÁVÁNÍ PLECHŮ.....	24
2.3.1 <i>Odvíjecí zařízení</i>	24
2.3.2 <i>Vysekávací část linky</i>	25
2.3.3 <i>Stohovací vozík</i>	28
2.4 SKLÁDÁNÍ MAGNETICKÉHO OBVODU	30
3. VÝROBA VINUTÍ	34
3.1 NAVÍJENÍ VINUTÍ NÍZKÉHO NAPĚTÍ	35
3.1.1 <i>Odvíječ vodivé fólie</i>	35
3.1.2 <i>Jednotky na úpravu fólie</i>	37
3.1.3 <i>Odvíječ izolace</i>	38
3.1.4 <i>Navíječ vinutí</i>	38
3.1.5 <i>Průběh navíjení</i>	39
3.2 NAVÍJENÍ VINUTÍ VYSOKÉHO NAPĚTÍ.....	41
3.2.1 <i>Přivedení drátu</i>	41
3.2.2 <i>Jednotka pro navíjení izolačních pásků</i>	43
3.2.3 <i>Navíjecí trn</i>	44
3.2.4 <i>Průběh navíjení</i>	44
3.3 CHLADICÍ KANÁLY	47
3.4 IZOLAČNÍ PAPÍR A VYTVRZENÍ VINUTÍ.....	49
4. NÁDOBA A SESTAVENÍ TRANSFORMÁTORU	50
4.1 VÝROBA NÁDOBY	50
4.2 FINÁLNÍ MONTÁŽ	51
5. NÁVRH OLEJOVÉHO DISTRIBUČNÍHO TRANSFORMÁTORU	53
5.1 VÝPOČET JMENOVITÝCH NAPĚTÍ A PROUDŮ VE VINUTÍCH	54
5.2 NÁVRH PRŮŘEZU JÁDRA.....	54
5.3 VINUTÍ NN.....	59
5.4 VINUTÍ VN.....	62
5.5 PŘÍDAVNÉ ZTRÁTY VE VINUTÍCH.....	75
5.6 IZOLACE A HLAVNÍ KANÁL	78
5.7 ZTRÁTY NAPRÁZDNO	80

5.8	ZTRÁTY NAKRÁTKO	83
5.9	NAPĚTÍ NAKRÁTKO	85
5.10	NÁDOBA	88
5.11	OTEPLENÍ	95
6.	NÁKLADY NA VÝROBU TRANSFORMÁTORU.....	99
7.	ZÁVĚR.....	102
	LITERATURA.....	103
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	105

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Základní části olejového hermeticky uzavřeného distribučního transformátoru [3]	13
2.1	a) Jádrové uspořádání trojfázového transformátoru b) Plášťové uspořádání trojfázového transformátoru [8]	17
2.2	Působení zkratových sil na kruhový a obdélníkový tvar vinutí [9]	18
2.3	Průřez jádra a vinutími různých tvarů, zleva kruhový, oválný a čtvercový tvar [9].....	19
2.4	Porovnání poskládání plechů v průřezu sloupku a jha	19
2.5	a) Spoj s pravým úhlem hrany včetně ovlivnění magnetického toku dírami v plechu b) Spoj s hranou stříženou pod úhlem 45° [7]	21
2.6	Detail spojů, zleva non step-lap, natupo a step-lap (s pěti kroky) [13]	22
2.7	Cesta magnetického toku ve spoji pro a) Non step-lap b) Step-lap [12]	23
2.8	Celá vysekávací linka Georg precisioncut TBA 400 [14]	24
2.9	Odvíjecí zařízení se čtyřmi bubny [14]	25
2.10	Řazení vysekávaných plechů v jedné sekvenci [14].....	25
2.11	Zleva a) Děrovací kleště b) Nůžky pro V-výseč c) Nůžky pro oddělení plechu pod úhlem 45° [14]	26
2.12	Diagram umístění stříhacích nástrojů v lince [14].....	26
2.13	Rozdíl rohového spoje dvou paketů a) Nejširší stupeň b) Ostatní stupně	27
2.14	Druhy step-lapu [15]	28
2.15	Zleva a) Magnetický servo pásový dopravník chvíli před upuštěním plechu na vyrovnávací kolíky b) Celý stoh střední nohy na stohovacím vozíku [14]	29
2.16	Stohovací vozík s podélnými a příčnými pozicemi pro stohování plechů [14]	30
2.17	Zleva a) Hrábě na vyjmutí sloupků ze stohovacího vozíku b) Vykládání hotového jádra ze stolu [14].....	31
2.18	Stůl pro vertikální skládání s popisem částí [14].....	32
2.19	Stůl pro horizontální skládání uprostřed zakládání plechů dolního jha [14]	33
3.1	Zleva dolů a) Popis částí odvíječe b) Umístění odvíječe v konstrukci navíječky c) Převíječ ochranného papíru [17]	36
3.2	Zleva a) Svařovací jednotka b) Ilustrace principu svaření za studena c) Umístění jednotek pro úpravu fólie [17].....	37
3.3	Zleva a) Popis dolní části navíjecího stroje b) Popis horní části [17].....	38
3.4	Zleva a) Umístění částí popsány v kapitole 3.1.3 Odvíječ izolace b) Umístění navíječky vinutí [17]	39
3.5	Zleva a) Průběh navíjení NN vinutí b) Vkládání chladicího kanálu [17].....	39
3.6	Ilustrace řezu NN vinutím s popisem jeho částí	40
3.7	Schéma přivedení drátu k vinutí vrstvou navíječkou [19].....	42
3.8	Schéma jednotky pro navíjení izolačních pásků [19]	44
3.9	Proces navíjení VN vinutí	45
3.10	Postup navíjení pro první tři polohy [19]	46
3.11	Konfigurace chladicích kanálů ve vinutích [4].....	48
3.12	Zleva a) Izolační papír s pryskyřicí [20] b) Stažené vinutí připravené na vytvrzení v peci	49
4.1	Zleva a) Vlnovec na jedné stěně [21] b) Celá nádoba na olej bez víka [22]	51
5.1	Parametry průřezu jádra	57
5.2	Značení parametrů v řezu vinutím NN. Rozměry na obrázku (především tloušťky izolací) jsou pro přehlednost zvětšené a neodpovídají skutečnému modelu.	60
5.3	Rozložení napětí ve vinutí VN při rázové zkoušce	68
5.4	Vyznačení vybraných parametrů ve dvou polohách vinutí VN.....	72

5.5	Značení parametrů v řezu vinutím VN. Rozměry na obrázku (především tloušťky izolací) jsou pro přehlednost zvětšené a neodpovídají skutečnému modelu.	73
5.6	Rozložení magnetické indukce rozptylového toku na axiální a radiální složky [5].	75
5.7	Parametry magnetického obvodu v podélném řezu aktivní části	81
5.8	Parametry stahovací konstrukce v příčném řezu horního jha	82
5.9	a) Uspořádání vinutí, jehož rozložení rozptylového magnetického pole lze rozdělit do dvou složek b) axiální c) příčnou	85
5.10	Horizontální řez transformátorem s vyznačením rozměrů nádoby	89
5.11	Příčný řez transformátoru s vyznačením rozměrů nádoby a dalšího příslušenství	91

SEZNAM TABULEK

5.1	Vstupní parametry pro návrh transformátoru	53
5.2	Tloušťky stupňů jádra v půlkruhové části na straně VN	56
5.3	Tloušťky stupňů jádra v půlkruhové části na straně NN	57
5.4	Počet závitů VN vinutí pro vyvedení odboček a kontrola jejich napěťového převodu	66
5.5	Výpočet tloušťky progresivní mezipolohové izolace	70
5.6	Specifikace mezipolohové izolace ve vinutí VN.....	72
5.7	Rozměry nádoby a dalších částí transformátoru, které jsou standardizované pro všechny výkony distribučních transformátorů	88
5.8	Rozměry nádoby a dalších částí, které jsou návrhu přiřazeny podle výkonu transformátoru	88
6.1	Náklady za díly magnetického obvodu	100
6.2	Náklady za díly ve vinutí NN.....	100
6.3	Náklady za díly ve vinutí VN.....	100
6.4	Náklady za nádobu a olej	100
6.5	Náklady ostatní příslušenství.....	101

ÚVOD

Největší počet kusů vyrobených výkonových transformátorů nachází využití jako distribuční transformátory, tedy že transformují vedení v rámci distribuční sítě z vysokého napětí, v České republice nejčastěji 22 kV případně 35 kV, na hladinu nízkého napětí, v drtivé většině 400 V. Olejové provedení je oproti suchému jednoznačně oblíbenější díky menším rozměrům a hmotnosti, a tedy hlavně nižší ceny. Tyto transformátory nejčastěji najdeme instalované do venkovního prostředí podle [1] jako trafostanice věžové, příhradové či jako různé druhy sloupových trafostanic. Často bývají ve vestavěných trafostanicích, a to buď v klasických zděných, nebo kioskových provedeních (plechová nebo betonová stanice). Obecně jsou to transformátory, které lze nejčastěji spatřit v běžném životě.

V roce 2014 však byly velmi zpřísněny požadavky na dovozené ztráty naprázdno a nakrátko všech výkonových transformátorů podle úředního věstníku Evropské unie 548/2014 [2]. Transformátor splňující toto nařízení nese označení EcoDesign. První stupeň nařízení přišel v platnost 1. července 2015 a pro jednotlivé výkony transformátorů je vypsána tabulka s maximálními hodnotami ztrát s nulovou tolerancí, což byla další změna oproti předchozí normě. Druhý stupeň EcoDesignu nabyde účinnosti 1. července 2021 a maximální hodnoty ztrát se ještě sníží.

Změna norem tak klade velký tlak na optimální návrh s dostatečnou rezervou při výpočtu ztrát, použití nejmodernějších technologií a nejkvalitnějších materiálů při výrobě. Nejvíce se změna dotýká rozměrů a ceny při porovnání s aktuálně vyráběnými transformátory, což je přesný protipól poptávky, kde větší rozměry můžou znamenat kompletní výměnu trafostanice, protože se do ní nový transformátor nevejde, případně sloup, na kterém je uchycený není dimenzovaný na větší hmotnost. Úkolem výpočtáře je tak najít zlatou střední cestu, kde výsledný návrh splňuje požadavky na ztráty a další normou definované parametry a zároveň se vejde do maximálních rozměrů či hmotnosti udané zákazníkem, a to vše tak, že při této konfiguraci jsou náklady na výrobu co nejmenší.

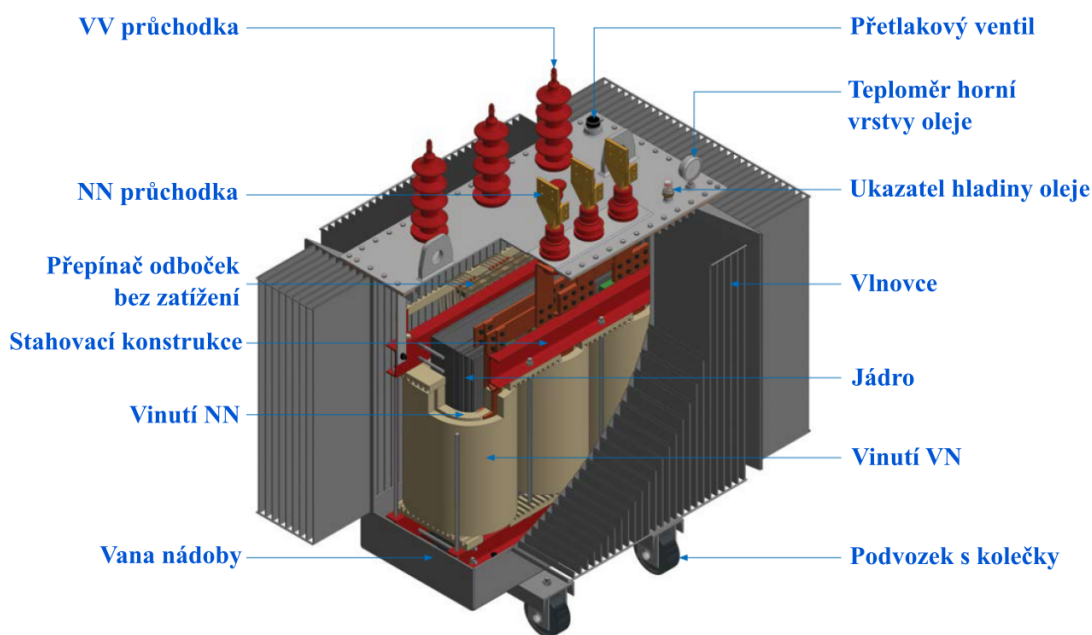
Práce je členěna do sedmi základních kapitol. Kapitola 1 slouží jako úvodní seznámení s problematikou výroby olejových distribučních transformátorů. V dalších třech kapitolách se postupem výroby transformátoru věnuje podrobněji. Kapitola 2 se zaměřuje na výrobu magnetického obvodu, kapitola 3 na výrobu obou vinutí a kapitola 4 výrobě nádoby včetně konečné montáže transformátoru. Kapitola 5 se věnuje podrobnému návrhu všech důležitých částí transformátoru od jádra, přes vinutí až po nádobu s olejem včetně kontroly na požadované ztráty nakrátko, naprázdno, napětí nakrátko a oteplení, vše s využitím optimalizačního programu firmy Elpro-Energo s.r.o. Podle návrhu se pak určí celkové náklady na výrobu zadaného transformátoru v kapitole 6. Poslední kapitola 7 představuje stručné shrnutí celé diplomové práce.

Práce byla sepsána ve spolupráci s firmou Elpro-Energo s.r.o.

1. ÚVOD DO VÝROBY OLEJOVÝCH DISTRIBUČNÍCH TRANSFORMÁTORŮ

Pro podrobný popis výroby olejového distribučního transformátoru je nejprve nutné zmínit jeho základní části, protože tyto části jsou jako u všech výkonových transformátorů vyráběny zvlášť na své výrobní lince a až následně smontovány do jednoho celku.

Nejdůležitějšími součástmi jsou na obrázku 1.1 jádro se stahovací konstrukcí čili magnetický obvod, vinutí NN a vinutí VN. Zmíněné součásti tvoří tzv. aktivní část transformátoru [3]. Velký rozdíl oproti suchým transformátorům je společné navíjení vinutí, kde se nejprve navine fóliové vinutí NN, na něj se přichytí hlavní chladicí kanál a rovnou se pokračuje navíjením VN vinutí z drátěného vodiče, takže spolu tvoří jeden celistvý dutý válec. U suchých transformátorů se každé vinutí vyrábí zvlášť a vzájemně se potkají až při konečné montáži, protože VN vinutí musí být samostatně zalito do pryskyřice a následně vytvrzeno.



Obrázek 1.1 Základní části olejového hermeticky uzavřeného distribučního transformátoru [3]

Další samostatnou součástí je nádoba pro olej, která se skládá z vany, vlnovců na bocích a víka. Na víku jsou uchyceny NN a VN průchodky a přepínač odboček při stavu bez zatížení. Vše uvedené tvoří standardní příslušenství, stejně jako podvozek s kolečky, která jsou nastavitelná pro příčný nebo podélný pojezd. Případně transformátor obsahuje další dodatečné příslušenství jako je např. přetlakový ventil, teploměr horní vrstvy oleje

či ukazatel hladiny oleje [4]. Jelikož je výroba nádoby složitá kovovýroba a nemusí se u ní řešit elektrické parametry, nebývá vždy součástí výrobní fabriky na transformátory, ale nádoby mohou být dováženy externě. Aby se vstupní investice do výrobních strojů pro ohýbání plechů a jejich svařování vyplatila, je zapotřebí velké kusovosti aktivních částí.

V následujících kapitolách jsou nejzákladnější části olejových distribučních transformátorů a jejich výroba rozebrány podrobněji.

2. VÝROBA JÁDRA

Magnetický obvod je důležitá aktivní část transformátoru, která přenáší elektrickou energii z jednoho vinutí do druhého v podobě energie magnetické. Bývá ve formě složených ocelových transformátorových plechů, které zajišťují cestu s malým magnetickým odporem magnetickému toku vzniklého buzením vinutí. Většinu toku pojme právě jádro, což snižuje přídatné ztráty v dalších konstrukčních součástech.

Díky výzkumu a vývoji výrobců oceli a transformátorů, byly vyvinuty materiály s vylepšenými vlastnostmi spolu s lepšími technologiemi pro jejich zpracování. Dříve byly pro výrobu používány plechy s mnohem horšími vlastnostmi a oproti dnešním standardům byly spojeny s vysokými ztrátami a magnetizačním výkonem. Později bylo zjištěno, že přidání křemíku (4-5 %) do slitiny oceli výrazně zlepšilo charakteristiky materiálu v důsledku zvýšení elektrického odporu a permeability. Snížily se i ztráty hysterezní, díky zmenšení plochy B-H smyčky. Od té doby jsou křemíkové oceli používány u většiny transformátorů. Přidání křemíku navíc napomáhá pomalejšímu stárnutí, ačkoliv křemík činí materiál křehčí, ale ne v takové míře, aby to působilo problémy při skládání plechů [5].

Následně byla zavedena technologie s válcováním plechů za studena, kde jsou zrna materiálu orientované ve směru válcování. Zpracování probíhá tak, že se optimální vlastnosti vyvíjejí ve směru válcování díky přísné kontrole orientace magnetických domén vzhledem k plechu (navržené Normanem P. Gossem). V tomto směru má lepší vlastnosti jako jsou snížené ztráty v železe a malá magnetostrikce. Ve směru válcování narostla magnetická indukce podle [6] o 30 %, ačkoliv magnetické nasycení kleslo o 5 %. Proto je orientovaná ocel vhodná primárně pro transformátory nikoliv pro magnetické obvody motorů.

Materiály různé kvality byly historicky představeny v následujícím pořadí [5]: neorientované, za tepla válcované orientované plechy (HRGO – hot-rolled grain-oriented), za studena válcované orientované plechy (CRGO – cold-rolled grain-oriented), za studena válcované orientované plechy s vysokou permeabilitou (Hi-B – high permeability cold-rolled), mechanicky nebo laserem stříhané. Dnes jsou nejběžněji používané Hi-B plechy, výroba oproti CRGO je zjednodušena eliminací jedné etapy válcování kvůli přidání přibližně 0,025 % hliníku do taveniny. Hi-B plechy mají měrné ztráty menší o 15-20 % než běžné CRGO. Ztráty se ještě dají snížit o 5-8 % laserovou úpravou, kde jsou magnetické domény více rozděleny [7].

Pro snížení vířivých ztrát se používají plechy s malou tloušťkou, aktuálně se tloušťka u výkonových transformátorů pohybuje v rozmezí od 0,23 mm do 0,35 mm, zatímco u malých transformátorků se používá tloušťka až 0,50 mm [5]. Je potřeba vzít v potaz, že čím menší tloušťka, tím se prodlužuje čas skládání jádra, protože počet plechů pro dosažení požadovaného průřezu roste. Tyto plechy mohou pracovat s magnetickou indukcí až do 1,75 T. EcoDesign svým zavedením automaticky omezuje použití kvality

transformátorového plechu na min. M085-23 [4], se ztrátovým číslem 0,85 W/kg při indukci 1,7 T, v tomto příkladu s tloušťkou 0,23 mm.

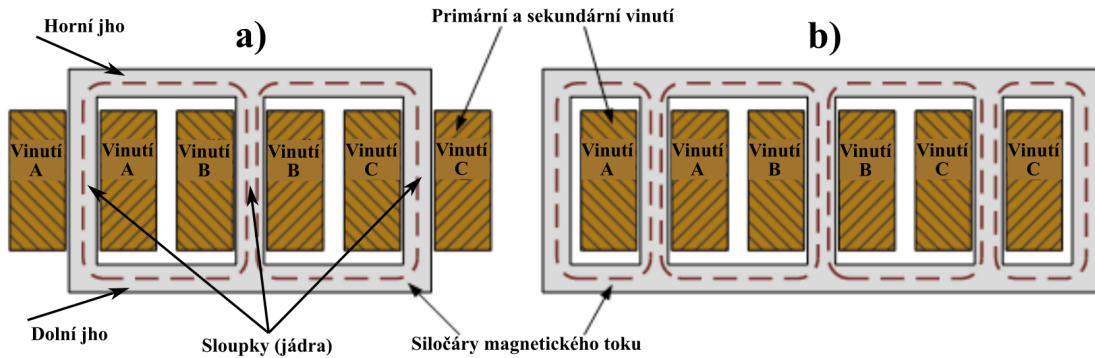
Plechý jsou pokryty anorganickou izolační vrstvou typicky šedé barvy, zvané Carlite. Je to finální úprava povrchu transformátorového plechu. Jedná se o 2-4 μm silnou vrstvu vznikající na obou stranách plechu chránící před přídatnými vířivými proudy. Skládá se ze dvou vrstev, základní C2 (skelný film), vznikající jako chemická reakce povrchu za vysokoteplotního žhání s MgO a přetvářející se na Mg_2SiO_4 . Po konečném očištění dalším žháním (800-850 °C) se nanáší finální fosfátová vrstva C5. Izolace je dostatečná, aby odolala indukovaným napětím o velikosti několika voltů.

Jelikož je jádro v blízkosti vinutí vysokého napětí, je uzemněno, jinak může získat vysoký potenciál v důsledku kapacitně přenášeného napětí z vinutí. Pokud je jádro z důvodu chlazení rozděleno kanály (o tloušťce asi 5 mm), musí být jednotlivé sekce uzemněny samostatně. Vzhledem k tomu, že kapacita mezi kterýmikoliv dvěma sousedícími plechy je velmi velká kvůli jejich velké ploše a velmi malé izolační mezeře mezi nimi, je kapacitní reaktance mezi nimi zanedbatelná. Proto všechny plechy v jedné sekci zůstávají téměř na stejném potenciálu. A tudíž je každá z částí uzemněna pouze v jednom bodě [5]. Někteří uživatelé dávají přednost uzemnění jádra vně nádrže prostřednictvím samostatné průchodky pro účely monitorování.

Spodní a horní jho jsou staženy stahujícími profily, které jsou z ohýbaného plechu nebo ocelových U-profilů, a na stranách jsou sešroubovány. Všechny vnitřní konstrukční části transformátorů (např. stahovací konstrukce) jsou uzemněny. Při navrhování uzemňovacího systému je třeba věnovat náležitou pozornost tomu, aby se zabránilo vzniku více uzemňovacích spojení, které by tvořily smyčky, ve kterých mohou být indukované rušivé proudy. Nádrž je uzemněna externě vhodným uspořádáním. Stahovací konstrukce, které se používají k upnutí jha a podpírání vinutí, jsou obecně uzemněny připojením k nádrži v jednom bodě pomocí měděného nebo hliníkového pásku. Pokud je spojení mezi stahovací konstrukcí a nádrží provedeno na dvou místech, může takto vytvořená uzavřená smyčka vázat značné množství rozptylového magnetického toku. Proud indukovaný ve smyčce může nakonec spojovací pásky spálit.

2.1 Konstrukční uspořádání magnetického obvodu

Pro olejové distribuční transformátory se využívá téměř výhradně jádrového trojfázového uspořádání magnetického obvodu, viz obrázek 2.1a. Z ekonomického hlediska a větším rozměrům se plášťový typ (obrázek 2.1b) vůbec nevyplatí.



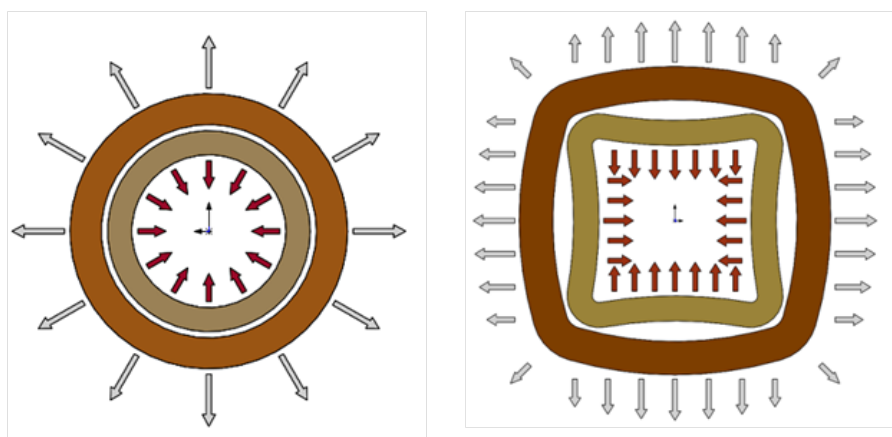
Obrázek 2.1 a) Jádrové uspořádání trojfázového transformátoru
b) Plášťové uspořádání trojfázového transformátoru [8]

Magnetický tok každé fáze se uzavírá přes sloupek a vrací se jhy a zbylými dvěma sloupkami. Průřez sloupku a jha bývá většinou stejný, je to i jednodušší při vysekávání jádra, protože se souvisle vysekává jedna vrstva ze stejného svitku plechu. Teoreticky by se dalo zvětšením průřezu jha docílit nižších ztrát naprázdno, ale kvůli nerovnosti průřezů mohou ztráty opět narůst z důvodu horších spojů mezi sloupkami a jhy, snížení ztrát tedy nebude efektivní. Jádrová konstrukce trojfázového transformátoru má vlastní trojfázovou nesymetrii způsobenou nerovnoměrně rozloženého proudu naprázdno mezi fázemi. Proudů ve fázích A:B:C jsou v přibližně v poměru 1 : 0,718 : 1, kde B je prostřední sloupek. Tato nerovnost je způsobená delší magnetickou cestou pro krajní sloupek, když se na délku magnetického obvodu podíváme z hlediska každé fáze samostatně. Symetrického jádra by se dalo docílit spojením sloupků do trojrozměrné hvězdy nebo trojúhelníku, tak že by vinutí mezi sebou mechanicky svírala úhel 120°, ale z hlediska výroby je takové provedení zbytečně složité [5].

U velkých výkonových, suchých a dřívějších distribučních olejových transformátorů bývají plechy jádra poskládány tak, aby vytvořily co nejvíce kruhový průřez, aby se dosáhlo maximálního využití prostoru uvnitř válcovitých vinutí. Stupňovitý průřez se blíží kruhovému tvaru pouze v závislosti na tom, kolik různých šířek plechu má výrobce připraven k vysekávání. U distribučních transformátorů se počet stupňů pohybuje v rozmezí od pouhých 5 až po 10 nebo více. Tvar jádra pak využívá přibližně 88% respektive 95 % plochy kruhu. Ve skutečnosti může být využití plochy lehce nižší, protože výrobci si kladou za cíl standardizovat rozsah šířek plechů pro pokrytí všech různých velikostí jader, nebo si může kupovat materiál již nařezaný, v takovém případě bude standardní rozsah šířek poskytovaný výrobcem elektrotechnické oceli omezen,

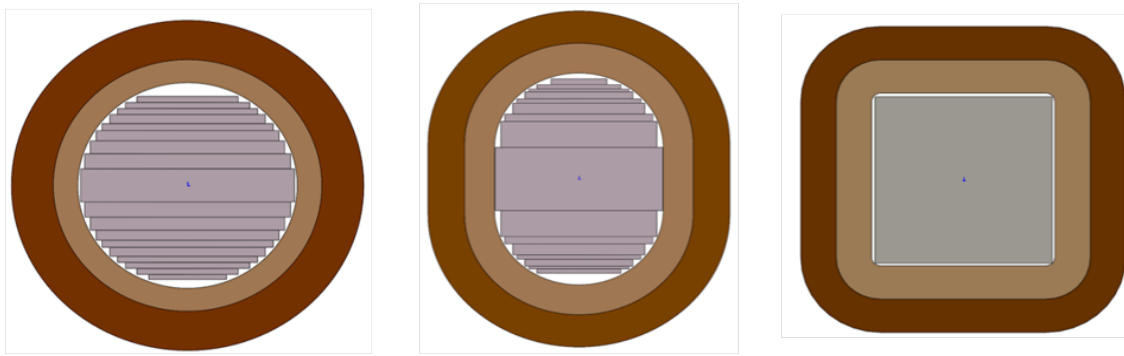
obvykle jsou odstupňovány po 10 mm např. od 50 mm po 440 mm šířky (dáno omezením vysekávacího stroje). Za takových podmínek je nepravděpodobné, že budou dostupné šířky pro optimální zaplnění jádra pro každý poloměr při daném počtu stupňů [7].

Maximální využití prostoru samozřejmě nabízí čtvercový či obdélníkový tvar jádra a vinutí zároveň, kdy navíc stačí jedna šířka použitého plechu, ale síly mezi vinutími vyvolané zkratovým proudem, které na takový tvar v kritických místech působí, jsou příliš velké. Běžně používaná technologie ale pro zpevnění vinutí nestačí, aby se zabránilo nežádoucí deformaci. Porovnání působení zkratových sil mezi vinutími je k nahlédnutí na obrázku 2.2.



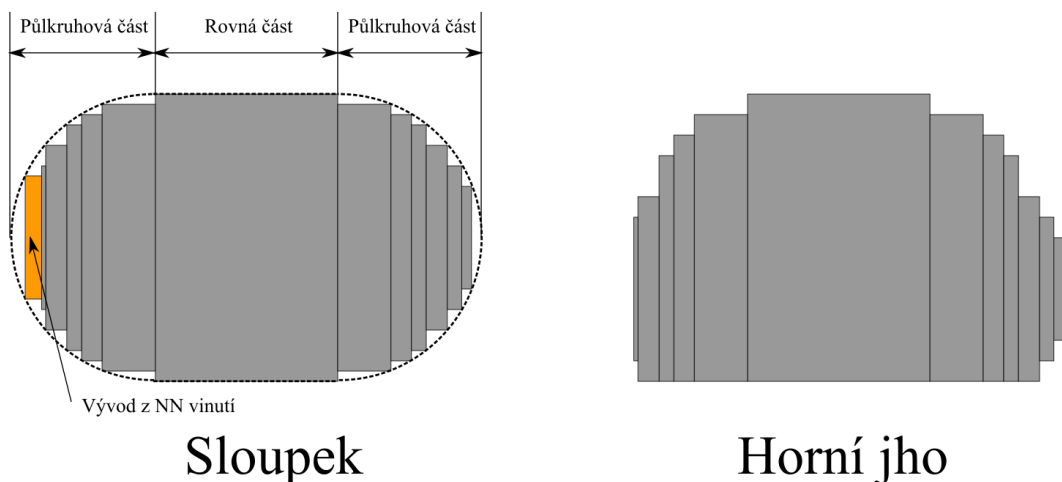
Obrázek 2.2 Působení zkratových sil na kruhový a obdélníkový tvar vinutí [9]

V posledních letech je však trendem používat jádro a také vinutí oválného tvaru v průřezu. U takového provedení je klasické kruhové jádro rozdělné na dvě poloviny a mezi ně je přidán další stupeň, který představuje rovnou část (vizuální demonstrace na obrázku 2.4). Jak uvádí [10] k této úpravě došlo v době, kdy velmi stoupla cena mědi a výroba vinutí byla výhodnější z hliníku. Aby však byly zachovány stejné ztráty, transformátory narostly ve váze i v rozměrech, což se neslučovalo s maximálními technickými specifikacemi energetických společností. Oválný design vyžadoval inovativní a složitější technologii navíjení, jako je oválný rozpínací trn, pohyblivé válečky v navíjecím stroji pro zajištění pevnosti a dynamické regulaci tažení drátu pro zajištění maximální rychlosti navíjení a zároveň požadované přesnosti parametrů vinutí. Bylo také nutné provést nové typové zkoušky, přes které nový design úspěšně prošel. Jelikož u oválného designu zkratové síly působí destruktivněji než u kruhového, aby vinutí zafixovaná vytvrzenou izolací napuštěnou pryskyřicí mechanicky vydržela s rezervou, doporučuje se tloušťkou rovné části nepřesáhnout 150 mm. Oválné jádro a vinutí je zobrazeno uprostřed na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3 Průřez jádra a vinutími různých tvarů, zleva kruhový, oválný a čtvercový tvar [9]

Co se týče tvaru průřezu jha distribučních olejových transformátorů, na rozdíl od sloupku již není trendem dosáhnout symetrického tvaru (např. u suchých má i jho stejný oválný průřez jako sloupek). Je ale snaha přeskládat plechy stejné šíře jako ve sloupku tak, aby tvořily rovnou hranu na straně směrem k vinutím. Sníží se tak hmotnost magnetického obvodu a lehce sníží ztráty. Jen poslední jeden až dva stupně jsou v rámci šířky vycentrovány se stupněm předchozím, a to jen kvůli snadnějšímu zakládání a stlačování plechů jha, viz obrázek 2.4.



Sloupek

Horní jho

Obrázek 2.4 Porovnání poskládání plechů v průřezu sloupku a jha

Jednou z nevýhod orientovaných plechů je to, že jakýkoliv faktor, který vyžaduje odchylku toku od směru orientace, zvýší ztráty v železe, což se v případě Hi-B plechů děje celkem často. Mezi takové faktory patří jakékoliv otvory v jádře, a také nutné zatočení magnetického toku v horním a dolním rohu jha. Díry v jádře vznikají technologickým postupem, a jejich účinek se víc projeví u jader menšího průřezu. S rostoucím průřezem jádra (rostoucí výkon transformátoru) jeho účinek klesá, protože díra má standardizovaný průměr 10 mm a jeho poměr k šířce plechu je menší. Druhý účinek

je patrný v tom, že vysoké štíhlé jádro bude mít nižší ztráty než krátké tlusté jádro stejné hmotnosti a se stejnou magnetickou indukcí, protože první zmíněné uspořádání má menší rohy, kde dochází ke změně směru toku magnetického toku [7].

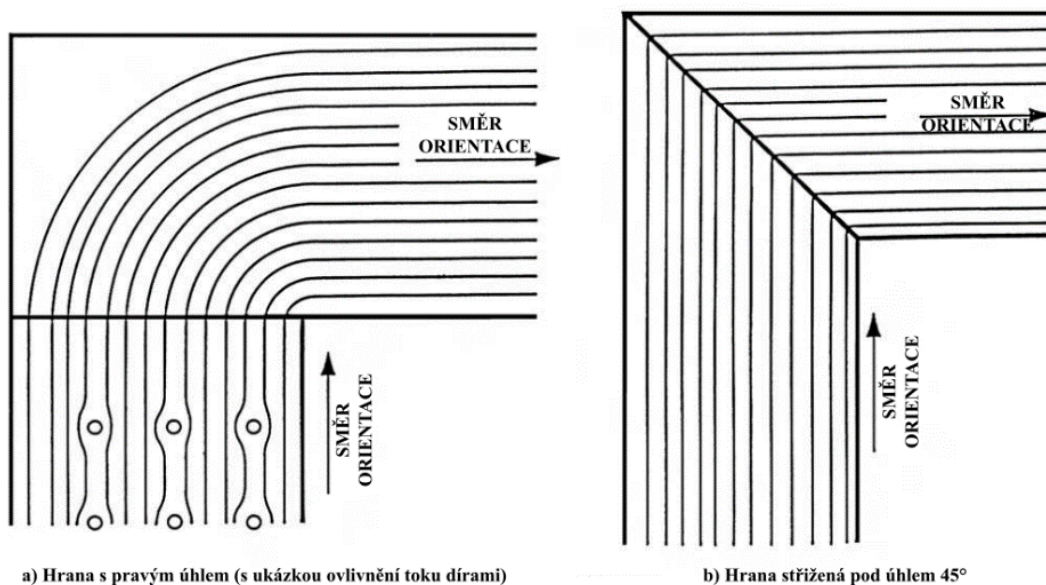
Podíl mezi ztrátami smontovaného magnetického obvodu a hmotností magnetického obvodu vynásobeného měrnými ztrátami je známý jako činitel přídavných ztrát naprázdno [11]. Hodnota tohoto činitele je důležitá při správném výpočtu ztrát naprázdno jakéhokoliv výkonového nebo distribučního transformátoru. Jedná se o empiricky odvozeného činitele, který je založen na zkušenostech výrobce transformátorů a pohybuje se od 1,08 do 1,35 pro třífázové jádrové magnetické obvody, jak je uvedeno v [12]. Činitel přídavných ztrát naprázdno je bezrozměrná veličina a záleží na mnoha faktorech, jako je jakost materiálu plechů, lidský faktor při skládání plechů, a především geometrie magnetického obvodu, tj. poměr objemu rohových spojů k celkovému objemu magnetického obvodu. Pročež pro transformátory malých výkonů (25 kVA až 100 kVA) se činitel pohybuje v rozmezí až 1,25 do 1,35, zatímco pro transformátor nad 25 MVA bude činitel relativně nižší od 1,08 do 1,15. Hodnota činitele přídavných ztrát teda klesá s rostoucím výkonem, protože větší výkon má výrazněji větší poměr mezi objemem jádra a objemem ve spojích, díry jsou také relativně menší. Jelikož z největší části rozhoduje o velikosti činiteli přídavných ztrát naprázdno spoj mezi plechem sloupku a jha, můžeme provést jeho rozdělení v následující kapitole.

2.2 Dělení jader z hlediska skládání plechů

2.2.1 Spoj s úhlem hrany 90° a 45°

Nezkosený spoj s úhlem hrany 90° (viz obrázek 2.5a) je jednodušší z hlediska výroby, ale protože jsou ve spojích větší ztráty, používají se jen pro malé transformátory. Spolu s neorientovanými plechy však byly používány i u transformátorů velkých výkonů.

U orientovaných plechů, aby se do určité míry omezilo odbočení magnetického toku od směru orientace plechu ve spojích mezi sloupky a jhy, je lepší stříhat pod úhlem 45° (viz obrázek 2.5 b), což je nejpoužívanější varianta. Úhel zkosení se však může pohybovat i od 30° do 60°.



Obrázek 2.5 a) Spoj s pravým úhlem hrany včetně ovlivnění magnetického toku dírami v plechu b) Spoj s hranou střiženou pod úhlem 45° [7]

2.2.2 Spoj natupo, non step-lap, step-lap

Metoda natupo spočívá ve skládání plechů na sebe tak, že všechny vrstvy jsou totožné a hrany ve spoji tvoří spojitou plochu, viz obrázek 2.6 uprostřed. Tato metoda je však v moderních velkých magnetických obvodech nepoužitelná, protože magnetický tok nemá jinou cestu než přes vzduchovou mezeru vzniklou ve spoji a tím vznikají významné ztráty.

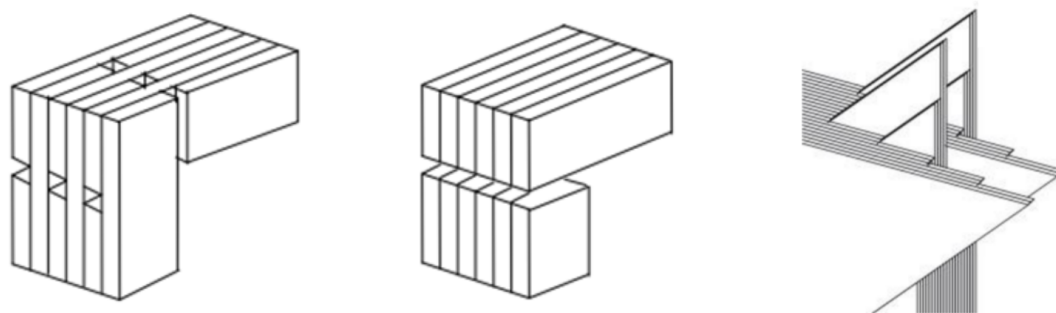
Tyto ztráty se dají eliminovat metodou přeplátování, která se dá rozdělit na non step-lap a step-lap. U stavby přeplátovaného jádra jsou plechy skládány tak, že mezery ve spoji mezi sloupky a jhy jsou překryty plechy další vrstvy. Tím, jak jsou plechy stupňovitě přesazeny a skládány jeden na druhý, mezery ve spoji netvoří rovnou plochu. Velikost přesahu se pohybuje okolo 15 do 20 mm. Ve spoji tak magnetický tok může pokračovat na sousední plech, aniž by procházel přes vzduchovou mezeru, která je přímo v jeho cestě. Mezera ve spoji hraje velkou roli ve velikosti ztrát a proudu naprázdno. Ve srovnání s nulovou mezerou je nárůst ve ztrátách 1 až 2 % pro 1,5 mm mezeru, 3 až 4 % pro 2,0 mm mezeru a 8 až 12 % pro 3 mm mezeru. Tyto čísla zdůrazňují, jak je důležité minimalizovat mezery při skládání plechů [5].

Metoda step-lap je charakterizována odstupňovaným přesahem plechů ve spoji, kde je odstupňování získáno rozdílnými délkami plechů v každém kroku. Počet kroků odstupňování bývá obvykle mezi 5 až 8 a každý krok má jeden nebo více stejných plechů na sobě. Tyto kroky jsou na sebe poskládány tak, že spoj v řezu připomíná schody. Plechy, které tvoří jeden cyklus kroků na jednom kusu (jho nebo sloupek), se nazývají paket (spoj dvou paketů je vidět vpravo na obrázku 2.6) a ty se opakují tak aby byla dosažena požadovaná tloušťka stupně. Šířka stupně kruhového jádra se snaží být

navržena tak, aby obsahovala ideálně celočíselný počet paketů, případně aby poslední paket byl více než poloviční z důvodu efektivity skládání jádra.

Non step-lap je ve skutečnosti předchůdcem step-lapu a je to nejjednodušší forma přeplátování, protože má pouze dva kroky, takže plechy mají pouze dvě konfigurace (viz obrázek 2.6 vlevo). Více kroků oproti jednoduchému překrytí však zajišťuje plynulejší přechod magnetického toku spojem a snižuje v něm tak ztráty, proto se non step-lap v Evropě a všude tam, kde jsou kladeny velké nároky na nízké ztráty, nepoužívá. S jádrem non step-lap jsou distribuční transformátory vyráběny například v Indii [12].

Na základě zkušeností se ukázalo, že čím méně plechů jeden krok přeplátování obsahuje, tím menší ztráty vznikají. Např. konstrukce se dvěma použitými plechy v kroku mají ztráty nižší o 3 až 4 % oproti čtyřem plechům v kroku a o další 2 až 3 % jsou ztráty nižší pro jeden plech. Na druhou stranu s klesajícím počtem plechů v kroku narůstá čas na skládání jádra. V praxi se proto osvědčilo použití dvou plechů na krok a např. ve firmě Elpro-Energo s.r.o. se používá step-lap se 6 kroky po 2 plechách, přesah mezi kroky je 3,6 mm, takže přesah plného paketu je 18 mm (s výjimkou plechu o šířce 50 mm, kde je z technologických důvodů možný přesah nejvíce 2,8 mm na krok).



Obrázek 2.6 Detail spojů, zleva non step-lap, natupo a step-lap (s pěti kroky) [13]

2.2.3 Přínos step-lapu oproti non step-lapu

Když se magnetický tok v jádře přiblíží ke vzduchové mezeře v rohovém spoji se jhem, má dvě možnosti – buď přejde vzduchovou mezerou ve spoji, kde je permeabilita mnohem menší ($=1$), takže magnetická vodivost vzduchu je mnohem menší. Druhou možností pro tok je, že protne izolaci mezi plechy a přejde do sousedního plechu ve vertikálním směru (směr kolmý na směr orientace válcování plechů) nad nebo pod, kde je permeabilita v řádu 10^4 a tedy magnetický odpor je mnohem menší.

Tok jednoznačně volí druhou možnost, tj. přejde skrz izolaci do plechu nad nebo pod ním. Nicméně když je CRGO nasyceno při magnetické indukci přibližně 2 T, je to mezní stav, který dovoluje přejití toku i přes vzduchovou mezeru ve spoji. Uvažujme jádro, které pracuje při velikosti amplitudy magnetické indukce 1,7 T. Jak se magnetický tok přibližuje k mezeře ve spoji, musí si vybrat mezi možnostmi 1 a 2 uvedenými výše.

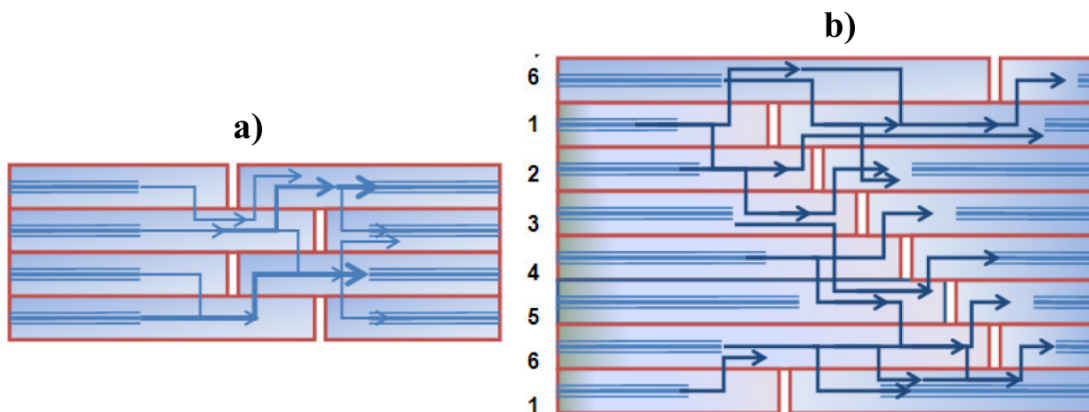
Když se veškerý tok přesune do sousedního plechu nad nebo pod, v jádře složeném metodou non step-lap, kde jsou pouze dvě konfigurace plechů, bude magnetická indukce

v překrývajícím plechu o hodnotě $3 \cdot 1,7 / 2 = 2,65$ T (viz obrázek 2.7a), což způsobí nahromadění toku a velmi překročí hranici nasycení CRGO plechu (která je přibližně 2 T). Tím pádem u non step-lap spoje část magnetického toku přejde do sousedních překrývajících plechů, avšak část toku bude muset také přeskočit vzduchovou mezeru (což je možnost 1). Dokonce i tok, který přechází do připojených plechů, zvyšuje v nich magnetickou indukci nad úroveň nasycení, což také přispívá k nasycení materiálu ve spojích a tím zvýšení ztrát naprázdno.

Tok, který přejde přes vzduchovou mezeru, přispívá k úbytku magnetického napětí a na krytí těchto ztrát vyžaduje větší proud naprázdno, aby se dosáhlo požadované magnetické indukce v jádře. Nadměrné nasycení materiálu v rohových spojích dále vede k vyšší magnetostrikci jádra, což je hlavní příčinou hladiny hluku v transformátoru.

Nicméně u metody step-lap je situace jiná. Tok, který se přibližuje ke vzduchové mezeře, má pro přenesení mnohem více možností, jak je možné vidět na obrázku 2.7b, a to jednoduše proto, že se zde vyskytuje více vrstev (kroků) plechů, do kterých se může tok přerozdělit. Jak je možné vidět ve schematickém znázornění jádra o šesti krocích, tok má úměrně šest možností pro překročení místo jen dvou, a proto je zde mnohem více rovnoměrné rozložení toku ve spojích, což vede k mnohem méně toku, který přeskočí přímo přes vzduchovou mezeru. Tím je příspěvek ztrát v rohových spojích menší a magnetická indukce zde zůstává okolo hranice nasycení, tedy 2 T.

Článek [12] uvádí, že přechod z non step-lapu na step-lap snížil činitel přídavných ztrát naprázdno o 5 až 8 %, kromě ztrát značně klesl proud naprázdno a také hladina hluku transformátoru. Step-lap však pro svou výrobu vyžaduje vysoce přesnou automatickou vysekávací linku, jedná se o velkou investici.



Obrázek 2.7 Cesta magnetického toku ve spoji pro a) Non step-lap b) Step-lap [12]

2.3 Proces vysekávání plechů

Následující popis se vztahuje k velkovýrobní automatické vysekávací lince od největšího výrobce vysekávacích strojů – německé firmy Georg GmbH. Model Georg precisioncut TBA 400 od tohoto výrobce (viz obrázek 2.8) využívá také Elpro-Energo s.r.o. Funkce linky se dá rozdělit do tří částí.

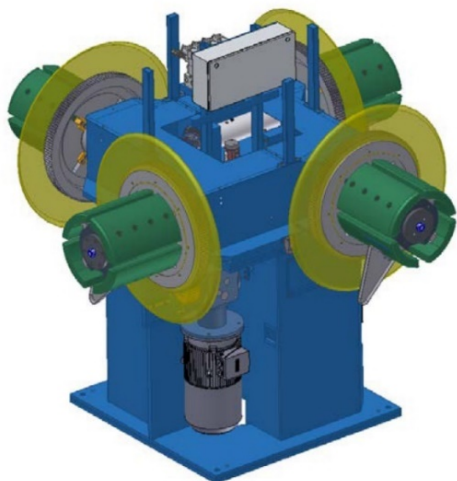


Obrázek 2.8 Celá vysekávací linka Georg precisioncut TBA 400 [14]

2.3.1 Odvíjecí zařízení

První část se skládá ze čtyř bubnů pro odvíjení, na které se nasouvají svitky elektrotechnické oceli požadované šířky. Jak je zobrazeno na obrázku 2.9 odvíjecí bubny jsou uchyceny na křížové hlavě, se kterou se dá otáčet. Při vysekávání se tak dá rychle přejít na jiný svitek otočením na následující buben. Jelikož většinou má jádro více než čtyři stupně a je tedy potřeba vysekat plechy z více než čtyř šířek pásu, je nutné svitky průběžně měnit. Velkou výhodou více bubnů je možnost výměny svitku obsluhou, zároveň co ze svitku na protilehlém bubnu probíhá odvíjení a vysekávání. Výměna svitků během vysekávání je důležitá pro efektivní využití času, neboť právě opatrné vytažení svitku z bubnu a jeho uložení na připravené místo (např. stojan na svitky) a pak následné nasazení nového svitku zabere z procesu vysekávání nejvíce času. Každý buben má čtyři segmenty, které jsou hydraulicky roztažitelné, aby mohly pevně uchopit střed svitku [14].

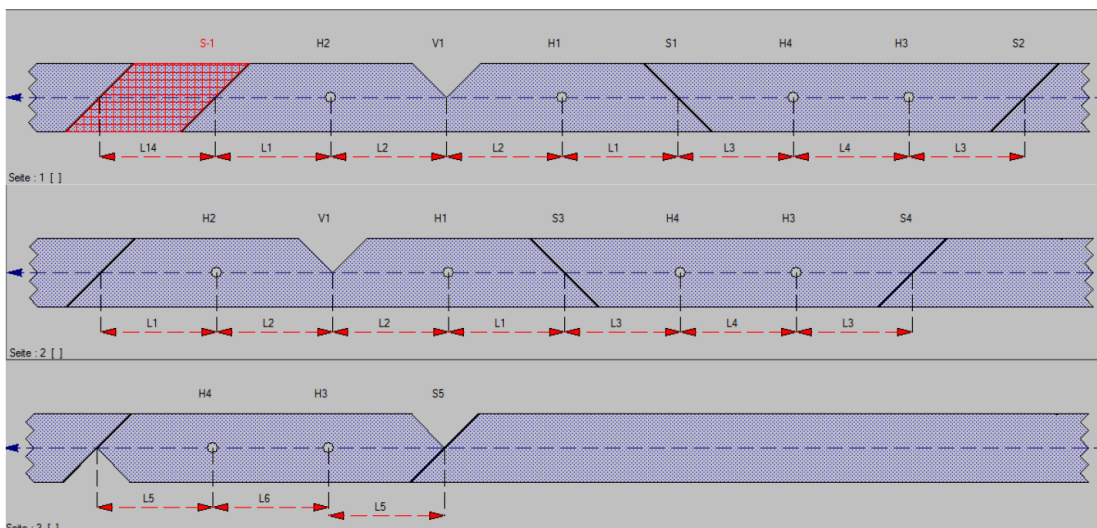
Na úvod vysekávání jedné tloušťky obsluha konec svitku odmotá manuálním ovládáním otáčení bubnu, na kterém je svitek nasazen. Jeho konec pak vloží do další části vysekávací linky, ve které je pohyb pásu plechu řízen již automaticky. Stejně tak při skončení vysekávání a změně svitku, musí obsluha zbytek zavedeného pásu v lince nejprve odstříhnout, vytáhnout a manuálním ovládáním navinout zpět na svitek. Pro fixaci svitku, aby se neodmotal, stačí proužek lepicí pásky. Zbytek odstříhnutého plechu v lince je odveden do odpadu.



Obrázek 2.9 Odvíjecí zařízení se čtyřmi bubny [14]

2.3.2 Vysekávací část linky

V další části vysekávací linky pás plechu vjíždí do podavače tvořený dvěma válečky, které řídí pohyb plechu. Dolní váleček je poháněn servomotorem a horní má nastavitelný tlak. Z pásu plechu pak probíhá vysekávání jednotlivých vrstev jádra. Plechy jsou vysekávány přesně v tomto pořadí: jho, krajní sloupek, jho, krajní sloupek a prostřední sloupek. Celá tato sekvence se pak neustále opakuje a je zobrazena na obrázku 2.10.



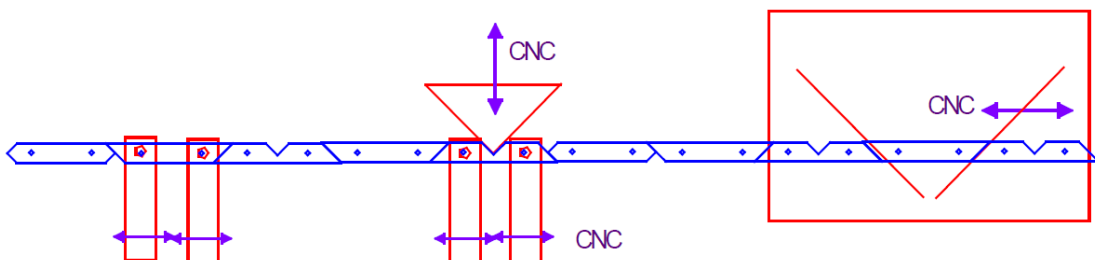
Obrázek 2.10 Řazení vysekávaných plechů v jedené sekvenci [14]

Plech prochází přes dva páry děrovacích kleští (viz obrázek 2.11a), každý pár razí díry do jednoho dílu o průměru 10 mm pro vyrovnání ve stohu. Všechny děrovací kleště jsou pohyblivé v podélném směru, ovládané jsou servomotorem. Mezi druhým párem kleští je nástroj pro stříhání V-výseče, ten je ukázán na obrázku 2.11b. Tato výseč je tvořena uprostřed jha pro spojení s prostředním sloupkem. Nástroj pro V-výseč je

pohyblivý v příčném směru s plechem, aby mohl měnit svou polohu pro tvorbu překrytí step-lapu. V-výseč je také uplatněna úplně na konci sekvence na středním sloupku pro dosažení požadovaného tvaru jeho konce. Jednotlivé plechy jsou pak od sebe odděleny dvěma nůžkami (viz obrázek 2.11c), které s krajem plechu svírají 45° a mezi sebou 90° . Rozložení nástrojů v lince je na obrázku 2.12. První nůžky jsou pohyblivé jen v příčném směru, druhé i v podélném. S jednou zastávkou zvládnou odstříhnout jedno jho a jeden krajní sloupek současně. Stejná myšlenka je i se zdvojenými děrovacími kleštěmi, kdy jsou do stejných dílů vyraženy vyrovnávací díry a V-výseč současně. Tím je proces velmi urychlen, neboť zdvojením jsou ušetřeny dvě zastávky pásu. Poslední díl v sekvenci, střední sloupek, prochází děrováním a V-výsečí na konci plechu pro oddělení. Požadovaného tvaru obou spojovacích hran je pak dosaženo nůžkami. Mezi sekvencemi, kdy se vysekává celá vrstva, se kus plechu odsekává do odpadu (na obrázku 2.10 červeně vyšrafovaná část), protože V-výseč a následný stříh pod úhlem 45° na sebe ne vždy přesně navazuje, ale může na dalším jhu nechat zub nebo otřep, což zhorší návaznost spojů a vlastnosti celého jádra. Odstřižené části plechu, které jsou nevyužité, jsou dopraveny až na konec vysekávací linky, kde končí v kontejneru pro recyklaci oceli [14].



Obrázek 2.11 Zleva a) Děrovací kleště b) Nůžky pro V-výseč c) Nůžky pro oddělení plechu pod úhlem 45° [14]



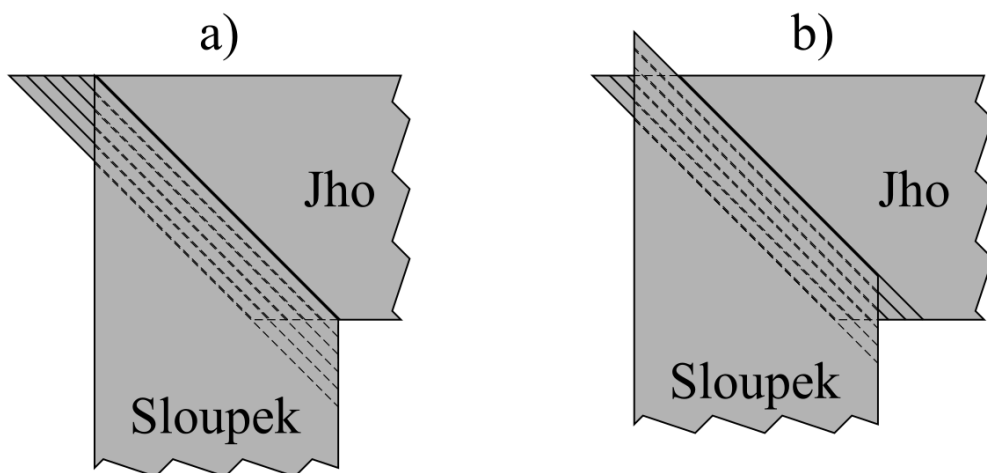
Obrázek 2.12 Diagram umístění stříhacích nástrojů v lince [14]

Logika vysekávání step-lapu je taková, že zatímco hrana spoje se od středu krajního sloupku s každou další vrstvou vzdaluje o hodnotu délky přesahu, tak v té stejné sekvenci

se hrana spoje jha přibližuje ke svému středu, nebo také naopak. Ve výsledku se tak pouze mění poloha stříhu mezi vyrovnávacími dírami krajního sloupku a jha.

Místa sekání jsou volena tak, aby střední hodnota stříhu mezi vrstvami jednoho paketu symetricky rozdělila roh magnetického obvodu. Při popisované symetrii tak po poskládání jádra trčí zuby od stěn rohů magnetického obvodu ve směru jádra i jha stejně velké, jako je tomu na obrázku 2.13b.

Výjimku tvoří nejširší stupeň jádra, kde je požadavek, aby horní a dolní plocha jeh magnetického obvodu byla rovná, bez zubů vzniklých step-lapem. Všechny zuby tak u nejširšího stupně trčí z boku levého a pravého sloupku jako je tomu na obrázku 2.13a. Takové provedení dovoluje stahovací konstrukci obepnout jha bez zbytečného odstupu od horní a spodní plochy.

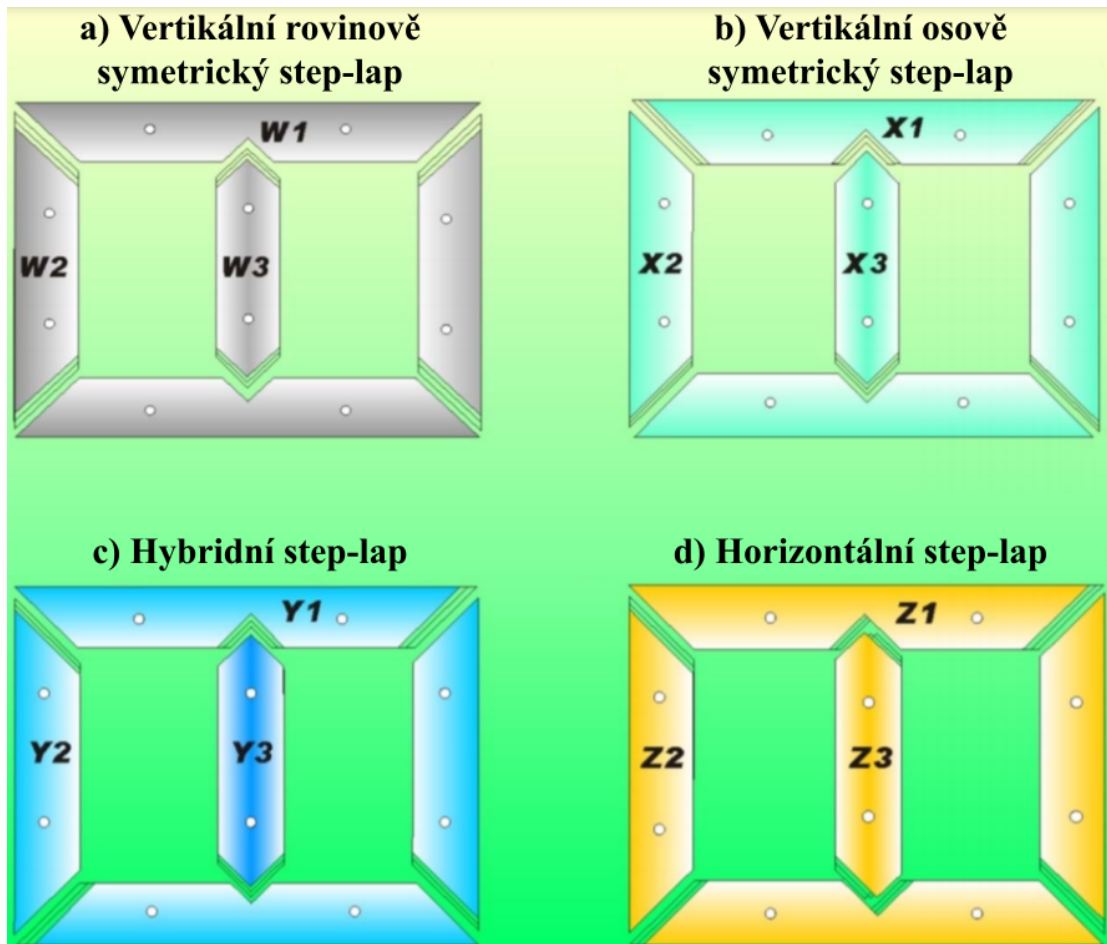


Obrázek 2.13 Rozdíl rohového spoje dvou paketů a) Nejširší stupeň b) Ostatní stupně

Pro vysekávání plechů, aby správně seděly spoje step-lapu, se používají čtyři postupy. Pro jejich rozlišení je nutné definovat viditelný a neviditelný krok. Viditelný krok znamená, že na hraně paketu sloupku nebo jha je plech s největším přesahem v dolní a s nejmenším v horní vrstvě paketu. Čili z vrchu jsou viditelné všechny kroky ve spoji paketu. Pokud paket otočíme, dostaneme neviditelný krok. Aby se jádro dalo poskládat, musí být spoj sloupku s neviditelným krokem a k němu spoj jha viditelným krokem nebo naopak. Konfigurace vysekávání step-lapu jsou následující [15]:

- Vertikální rovinově symetrický step-lap – Oba spoje všech sloupků jsou jednotně viditelné nebo neviditelné kroky, spoje jha jsou pak všechny s opačným krokem (viz obrázek 2.14a)
- Vertikální osově symetrický step-lap – Jha má jednotný krok na všech svých spojích, avšak obě jha jsou s opačným krokem. Vrstvy sloupků jsou pak všechny stejně dlouhé, rozdílná je jen poloha vyrovnávacích děr (viz obrázek 2.14b).
- Hybridní step-lap – Je totožný s horizontálním step-lapem až na řešení spojů středního sloupku. Ten je totožný s vertikálním řešením (viz obrázek 2.14c).

- d) Horizontální step-lap – Oba koncové spoje každé části jsou s opačným krokem a prostřední sloupek je navíc z poloviny s neviditelným a na druhé polovině viditelným krokem. Přesah plechů se hýbe nikoliv ve směru vertikálním, jako u bodů a, b, c, ale ve směru horizontálním (odtud pochází název rozdělení). Plechy všech vrstev krajních sloupků a obou jeh mají stejné rozměry, jen mají posunuté díry (viz obrázek 2.14d).



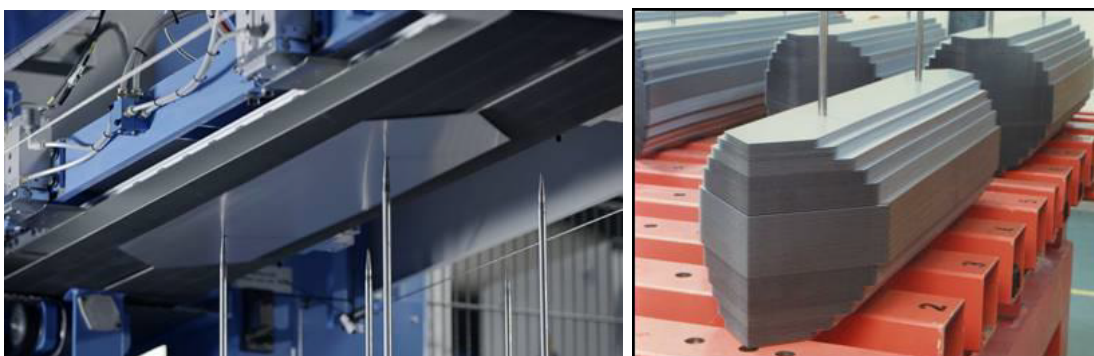
Obrázek 2.14 Druhy step-lapu [15]

2.3.3 Stohovací vozík

Vyseknuté plechy jsou pásovým dopravníkem transportovány nad stohovací vozík. Horní plocha vozíku se skládá ze svařovaných obdélníkových ocelových trubek, které jsou rovnoběžně uspořádány, příčně ve směru pohybu plechů. Rozteč trubek je 100 mm a stejnou rozteč v příčném směru v nich mají i díry pro umístění srovnávacích kolíků (proto musí být vzdálenost mezi dírami v plechu celočíselný násobek 100 mm). Kolíky musí být manuálně namontovány na pozice, které vyžadují rozměry daného designu vysekávaných plechů [14].

Nad tyto pozice jsou plechy přeneseny pěti magnetickými servo pásovými dopravníky pro přepravu na spodní straně pásu. Takový dopravník je k vidění na obrázku 2.15a.

Jakmile je dosažena přednastavená poloha stohování v řídicím systému, magnetická tyč se posune pryč od pásu a plech je upuštěn přesně tak, aby padal vyseknutými otvory na kolíky, po kterých sjede dolů a je perfektně se srovná se zbytkem stohu. Stoh postupně roste, až tvoří celý sloupek nebo jho. Z tohoto důvodu se začíná vysekávat od nejužšího svitku plechu po nejširší a zase zpátky po jednotlivých šířkách stupňů jádra, jak je demonstrováno na obrázku 2.15b. Aby bylo vysekávání co nejvíce časově efektivní, především kvůli výměnám svitků plechu, je vhodné vysekávat více kusů magnetického obvodu současně, ideálně stejného designu nebo více designů, u kterých je použito více stejných šířek pásů plechu.



Obrázek 2.15 Zleva a) Magnetický servo pásový dopravník chvíli před upuštěním plechu na vyrovnávací kolíky b) Celý stoh střední nohy na stohovacím vozíku [14]

Z tohoto důvodu je stohovací vozík dostatečně široký, aby se na něj vlezlo více kusů v příčném směru. Vozík se pohybuje na lineárních ložiscích umístěných na základních trámech. Pohyb vozíku je motorizovaný, což právě umožňuje dávkovou výrobu s automatickým pohybem vozíku a pneumatickým centrovacím zařízením, čímž se dosáhne přesného polohování pro různé příčné polohy stohování (viz obrázek 2.16). Poloha vozíku se mění až po dokončení plné výšky dané tloušťky stupně v celé řadě (pro celé jedno / dvě jádra). Pro maximální výkon vysekávání je nejlepší, aby se plná sekvence (jeden magnetický obvod) vlezl do jedné řady na stohovacím vozíku, aby se s ním nemuselo hýbat.

Pro střední délku plechů menších jak 650 mm lze v jedné řadě vytvořit 10 stohovacích míst, takže se zde vlezou dvě plné sekvence vysekávání (dva identické magnetické obvody), což přináší ještě větší výkon. Pro plechy střední délky do 1200 mm se vlezle do jedné řady 5 stohovacích míst. Plechy střední délky do 2200 mm případně 2500 mm mají k dispozici 3 respektive 2 stohovací místa, což už vyžaduje jinou sekvenci vysekávání. Plechy ale nabývají takové délky až u transformátorů s výkonem 10 nebo 20 MVA.



Obrázek 2.16 Stohovací vozík s podélnými a příčnými pozicemi pro stohování plechů [14]

Model Georg precisioncut TBA 400 dokonce využívá dva stohovací vozíky, kde se oba mohou automaticky prohodit. Na jednom z nich může probíhat stohování, zatímco z druhého jsou odebírány vyseknutá jádra, případně vyměňovány pozice zarovnávacích kolíků pro vysekávání dalších designů.

Důležitou součástí stohování je laserové měření výšky balení, které je potřeba pro kompenzaci skutečné tloušťky plechu, která má určité odchylky od teoretické hodnoty. Měření výšky probíhá automaticky na jednom sloupku nebo jhu a korekce je přenesena na zbylé stohy. Kompenzace je založená na změření výšky celého stohu a z něj se vypočítá aktuální výška stupně. Ta je podělena počtem plechů v něm a z toho se určí průměrná skutečná tloušťka použitého svitku. Následně se dopočítá o kolik více vrstev (většinou je skutečný plech tenčí) je potřeba vyseknout na rozdíl od vypočítaného počtu plechů pro zachování požadované výšky stupně. Pro urychlení procesu je měřena pouze první polovina stohu, protože druhá je vysekávána ze stejných svitků a tloušťka plechu se v nich ze zkušenosti už moc nemění [14].

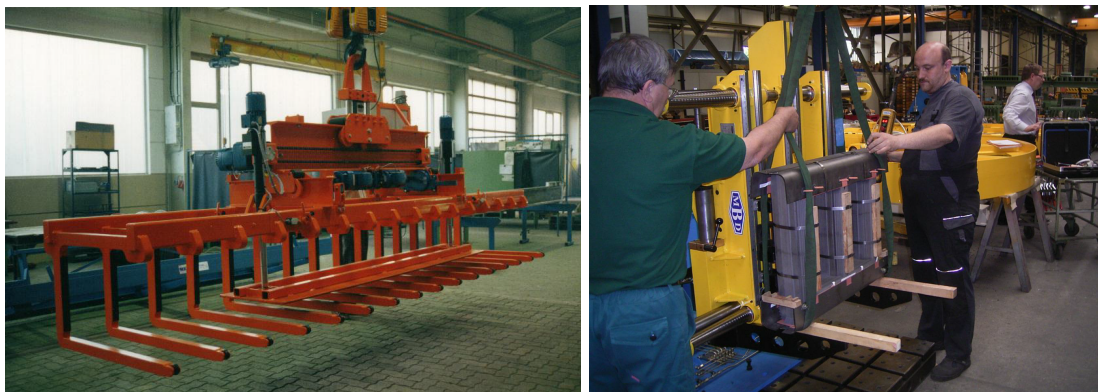
2.4 Skládání magnetického obvodu

Skládání magnetického obvodu se dá provést dvěma různými postupy – skládání ve vertikální nebo horizontální poloze. Skládání vyžaduje speciálně nastavitelný vyklápecí stůl, avšak u vertikálního skládání ještě musí být otočný o 180° na rozdíl od horizontálního, což stůl prodražuje. Ve vertikální poloze je ale zakládání plechů jednodušší a také méně časově náročné, navíc lze použít jiný tvar bočnic [14].

U obou postupů se magnetický obvod skládá bez horního jha, magnetický obvod je pak ve tvaru E. Horní jho se nasazuje až po nasunutí všech vinutí na sloupky. Pokud se však jedná o nový design, první jádro je vhodné poskládat celé a změřit jeho skutečné ztráty naprázdno, jestli splňuje požadavky normy. Pokud ztráty vyhoví, teprve pak má smysl pokračovat s výrobou vinutí.

Celý proces skládání začíná už na stohovacím vozíku, kde se využívá už správně seskupených plechů jednotlivých sloupků a jeh. Srovnávací kolíky jsou vyměněny za jiné

vhodné pro přenos celých sloupků, které tak mají zafixovaný tvar. Vyjmutí sloupků se provádí jeřábem se speciálními vykládacími hráběmi na jejich konci, jako na obrázku 2.17a. Hrábě jsou vyrobeny tak, že krásně zajedou do mezer mezi trubkami stohovacího vozíku. Ještě před vyjmutím jsou plechy sloupku pro jistotu sevřeny pákovými svorkami. Mimo hrábě se sloupky dají také nabírat jednoduchými popruhy, sloupky tak ale nejsou rovnoměrně podepřeny.



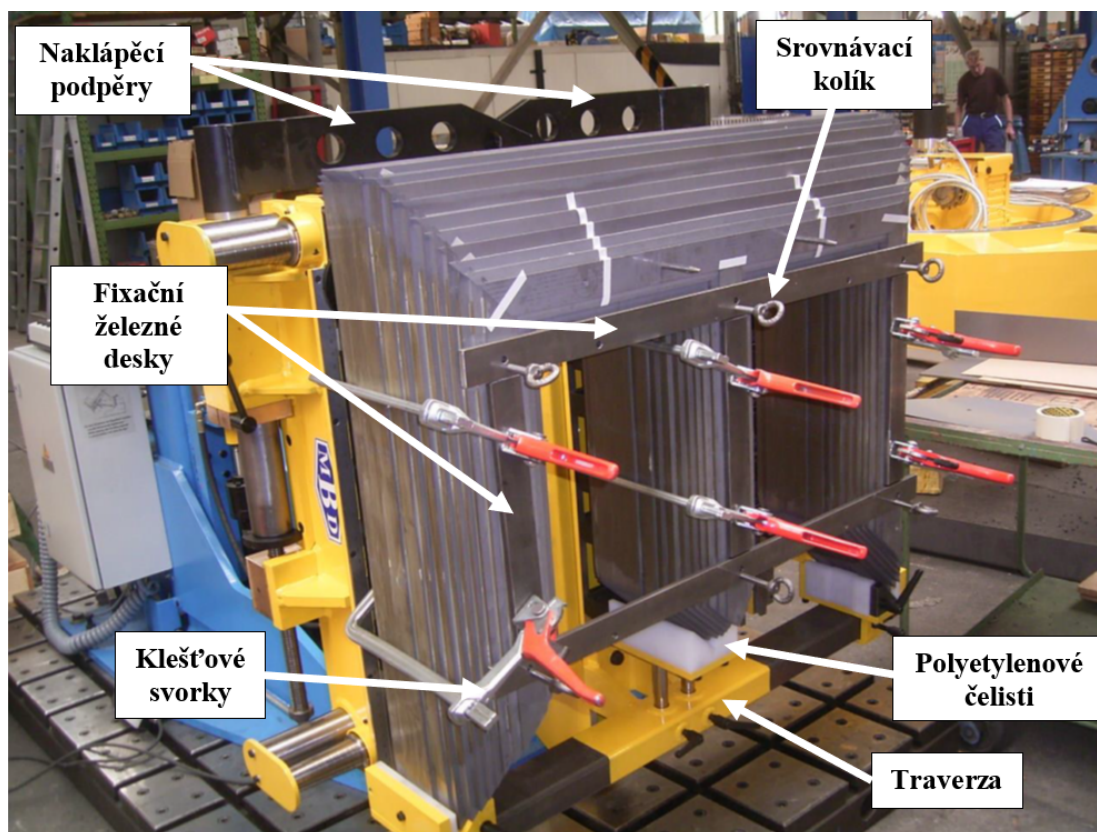
Obrázek 2.17 Zleva a) Hrábě na vyjmutí sloupků ze stohovacího vozíku
b) Vykládání hotového jádra ze stolu [14]

Po vyjmutí se prostředky sloupků a jeh potrou lepidlem na povrchu, kde se potkávají hrany sousedících plechů. Ztvrdnutím lepidla se tak ještě více zpevní jejich tvar, u jha se pak dají odtrhnout jednotlivé pakety, ve kterých se už plechy nerozjíždějí, ale pevně drží, což velmi ulehčuje skládání.

Všechny sloupky se poté upevní i se srovnávacími kolíky na skládací stůl. Ten se skládá z nosičů pro sloupky, kde poloha prostředního nosiče je fixní a krajní mají nastavitelnou vzdálenost od středního nosiče pomocí vřetenových pohonů, tak aby odpovídaly návrhu jádra. Na nosiče se pak umístí stojany pro srovnávací kolíky a podpěrky, které s určitým rozstupem podpírají sloupky a také podpěrky pro jha. Po usazení sloupků na stůl se na jejich horní plochu pod kolíky nasadí železné desky s dírami, které se přitlačí pákovými svorkami a úplně zafixují vzájemnou polohu sloupků a zamezí i jejich drobnému natočení, protože každý milimetr při skládání může ovlivnit výsledek. Na straně, kde se jho dává až po nasunutí vinutí, se sloupky ještě zpevní traverzou, která má polyetylenové čelisti, do kterých se vloží konce sloupků. Traverza je uchycená k nosičům a je přitlačena k nohám.

U vertikálního skládání se stůl (např. Georg precisionstack table typu H VT na obrázku 2.18) vyklopí o 90° traverzou směrem k zemi a začne se zakládat dolní jho po jednotlivých paketech, to se teď ale jeví jako jho horní. Dělníci si nejprve musí vytvořit místo na koncích sloupků špachtlí, aby byla dobře vidět správná návaznost jednotlivých plechů v každém spoji. Jelikož se začíná od nejspodnějšího paketu, který je nejužší, špatně se k němu dostává. Aby se aspoň trochu přístupnost těchto paketů zlepšila,

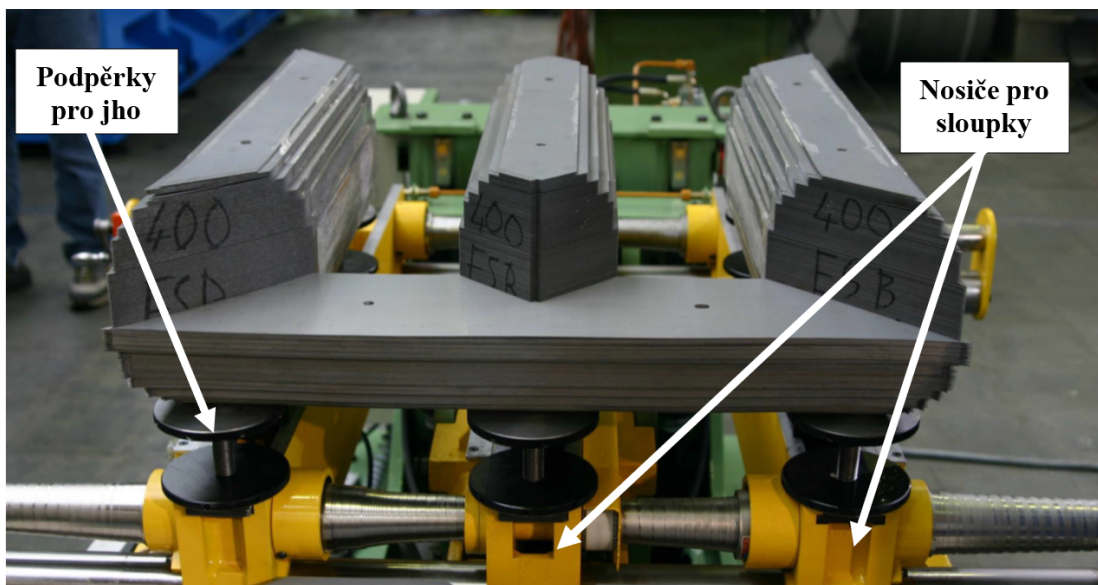
vysekávání jádra začíná na straně, kde jsou plechy odebrány kvůli vývodům z NN vinutí a touto stranou jsou sloupky položeny na stůl. Další pomocí je vycentrování pár posledních stupňů jádra, které už netvoří rovinu na straně vinutí (viz obrázek 2.4), plechy jsou tak výš a lépe se k nim dostává. To také způsobí lepší rozložení síly při utažení jha stahovací konstrukcí. Detailem pro lepší viditelnost při zakládání plechů ve spoji je vysekávání sloupek s viditelným krokem. Po dokončení zakládání jha se sešroubuje stahovací konstrukce, která je ještě vystlaná lepenkou. Na plochy sloupku jsou položeny dřevěné trámy, a celé jsou staženy železnou páskou. Trámy jsou ze dřeva, protože nejsou elektricky ani magneticky vodivé a nezvyšují tak ztráty, naopak nasají olej a plní izolační funkci. Jho se ještě přitlačí k nohám šroubovatelnými naklápěcími podpěrami, které jsou upevněny na krajních nosičích. Stůl se následně vrátí do horizontální polohy a v této poloze se otočí o 180°, aby mohl být vyklopený s poskládaným jhem směrem k zemi, a jádro může být odebráno jeřábem s popruhy. Odebírání hotového jádra je na obrázku 2.17b.



Obrázek 2.18 Stůl pro vertikální skládání s popisem částí [14]

U horizontálního skládání se spodní jho zakládá stejným způsobem jako u vertikálního skládání, jen v horizontální poloze, protože stůl se vyklápí rovnou se založeným jhem dolů. Stůl pro horizontální skládání např. od firmy Georg GmbH má označení Georg precisionstack table typu H a je na obrázku 2.19. Zakládání je tak

komplikovanější, protože ke spojům sloupku je ještě horší přístup a plechy jha mají tendenci se rozjíždět směrem pryč od sloupků. Tento postup vyžaduje i jiný tvar stahovací konstrukce, protože její první polovina musí být položena ještě před zakládáním jha a nemůže překážet. Proto mívá tvar U a trčí pryč od jha. Horizontální skládání se dá provádět i po jednotlivých paketech či vrstvách všech částí, což je výhodné u transformátorů velkých výkonů, protože jednotlivé plechy mají značnou hmotnost a špatně se s nimi manipuluje.



Obrázek 2.19 Stůl pro horizontální skládání uprostřed zakládání plechů dolního jha [14]

3. VÝROBA VINUTÍ

U trojfázového dvouvinutového transformátoru se předpokládá, že obsahuje oddělené primární a sekundární vinutí. Obě tvoří soustředné válce spolu se sloupkem jádra, které poskytuje cestu malého magnetického odporu pro uzavření smyčky magnetického toku. Vinutí NN bývá většinou blíže k jádru, protože mezi jádrem a tímto vinutím není potřeba tak silná izolace jako by v tomto místě potřebovalo vinutí VN. Závity vodiče jsou tak vinuty s menším poloměrem a zároveň roste poloměr navíjené izolace pro VN vinutí víc, než kdyby byla vinutí prohozená. A to je ekonomicky výhodné, neboť náklady na izolaci jsou zanedbatelné s porovnáním nákladů na vodič.

Na velikosti vinutí závisí celková velikost transformátoru, protože určují rozměry okna, které jádro musí svým tvarem zajistit. Tím také ovlivňují velikost průřezu jádra, protože na průřezu a třídě elektrotechnické oceli jádra závisí pracovní magnetická indukce a ta určuje ztráty naprázdno. Návrhář musí usilovat o co nejkompaktnější uspořádání vinutí, tedy aby bylo pevné a co nejefektivněji využívalo prostor. Proti tomu stojí potřeba poskytnout prostor pro chladicí kanály, izolaci, mezery mezi jádrem a vinutími a mezi vinutími navzájem pro průchod oleje, a hlavně získat co největší průřez vodiče, který dříve býval nejčastěji z mědi, dnes z hliníku, aby se minimalizovaly ztráty nakrátko.

Následující část popisuje, jak je v praxi dosaženo nejlepšího kompromisu mezi těmito protichůdnými cíli. Nejprve je nutné se podrobněji zabývat tématem ztrát nakrátko. Ztráty nakrátko transformátoru jsou definované jako ztráty způsobené průchodem zátěžného proudu a mění se s druhou mocninou zátěžného proudu. V transformátorech můžeme rozlišit tři komponenty ztrát nakrátko [7]:

- 1) Ohmické ztráty, často označované jako I^2R .
- 2) Ztráty vířivými proudy ve vinutí způsobené střídavými rozptylovými toky procházející skrz vinutí. Výsledkem těchto vířivých proudů je skin efekt a jev blízkosti.
- 3) Tzv. přídavné ztráty ve vývodech, stahovací konstrukci jádra a nádobě způsobené rozptylovými toky.

Největší podíl mají samozřejmě ztráty přímo ve vinutí. Ohmické ztráty, jak termín naznačuje, jsou způsobeny skutečností, že vinutí nejde vyrobit bez přítomnosti elektrického odporu. Existují však způsoby návrhu, jak ztráty co nejvíce snížit:

- Použití materiálu s nejnižší rezistivitou, což je samozřejmě měď s vysokou vodivostí, aktuálně však převážně hliník z ekonomického hlediska.
- Použití co nejméně možných závitů vinutí.
- Zvětšení průřezu vodiče ve vinutí

Jak uvádí [7], minimalizace počtu závitů vinutí znamená, že jádro musí pracovat s co největší přijatelnou magnetickou indukci a musí mít adekvátně velký průřez. Tím však roste velikost a hmotnost jádra, takže kontraproduktivně rostou ztráty naprázdno. Snížení ztrát nakrátko tak jde na úkor zvýšení ztrát naprázdno a naopak. Zvětšení poloměru jádra má za následek zvýšení rozptylové reaktance, proto musí být zkrácena axiální délka vinutí, aby se tato změna kompenzovala. Na návrháři tedy je najít rozumné optimum mezi těmito protichůdnými požadavky.

Negativem zvětšení průřezu vodiče je zvětšení okna, a tím dochází k většímu rozptylovému toku. Ten ve vodiči indukuje napětí, která ústí vznikem vířivých proudů. Navíc, čím větší je průřez vodiče, tím menší je odpor k indukovaným napětím rozptylovým tokem, a tím roste i velikost vířivých proudů. Jedinou možností, jak zvýšit rezistivitu vířivým proudům, je vodič rozdělit do více dílčích vodičů, které jsou mezi sebou izolovány. Použití více svazkových vodičů se ale vyplatí až u větších výkonů, nikoliv u distribučních transformátorů. Jelikož vířivé proudy jsou důsledkem rozptylového toku, redukce toku vede i ke snížení vířivých proudů. Například vysoké štíhlé jádro bude mít menší rozptylový tok a také menší vířivé proudy než jádro, které je nízké tlusté.

3.1 Navíjení vinutí nízkého napětí

Vinutí nízkého napětí, přesněji vinutí s maximálním provozním napětím do 1,1 kV, tedy více než 90 % distribučních transformátorů, bývá provedeno téměř vždy jako fóliové. Vinutí si lze zjednodušeně představit jako roli alobalu nebo jako svitkový kondenzátor. Tato technologie je efektivní, protože na straně NN je potřeba jen něco kolem 30 závitů, vinutím však teče velký proud (např. pro transformátor o výkonu 630 kVA teče jmenovitý proud 909 A), a aby byla zajištěna přijatelná proudová hustota (pro hliník maximálně 1,5 A/mm² a pro měď 2 A/mm²), je zapotřebí dosáhnout velkého průřezu vodiče, a proto šířka fólie zabírá celou výšku vinutí. Výhodami této metody je vysoká rychlost a jednoduchost navíjení, značně snížené dodatečné ztráty, vysoká zkratová pevnost v axiálním směru díky rozložení proudu po celé délce vinutí, jednoduše se dají zavádět axiální chladičí kanálky bez snížení mechanické pevnosti, a vyrovnané rozložení teplot ve vinutí [16].

Pro navíjení fólie slouží speciální navíječky. Nejznámějším výrobcem těchto navíječek v Evropě je Švýcarská firma Tuboly-Astronic AG. Pro distribuční transformátory je od tohoto výrobce nejvhodnější model navíječky EFECO 800-1 C, který opět také využívá Elpro-Energo s.r.o. Popis funkce takového stroje a postup výroby je uveden v následujících odstavcích. Navíječka EFECO 800-1 C má modulární konstrukci. Skládá se z odvíječe fólie, jednotek na úpravu fólie, odvíječe izolace a z místa, kde je tvořeno výsledné vinutí [17].

3.1.1 Odvíječ vodivé fólie

Navíjecí stroj je vybavený jedním odvíječem vodivé fólie, který je zobrazený na obrázku

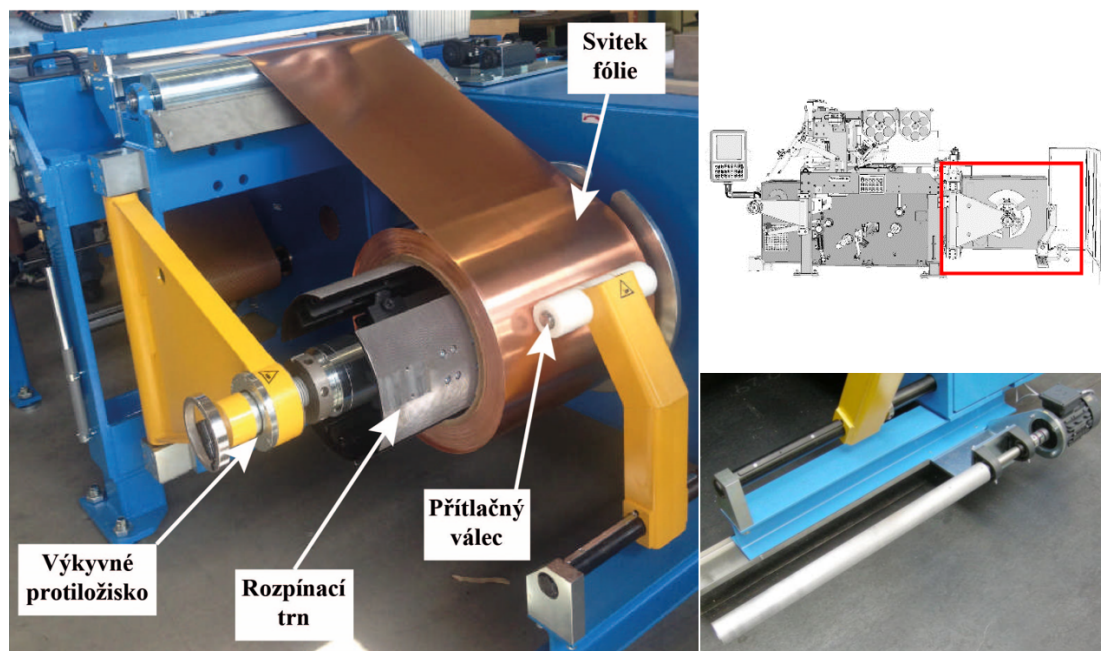
3.1. Skříň odvíječe vodivé fólie je namontovaná na příčně posuvné jednotce. Přesnost polohy hran vodivé fólie je monitorována a regulována fotočlánkem připevněným ke skříni navíjecího stroje. V případě odchylky se odvíječ přesune do správné polohy. Tato řídicí funkce zaručuje vysoce přesnou polohu hran fólie, která nezávisí na rychlosti navíjení. Tento systém umožňuje navíjet cívky v úzkém rozsahu tolerance.

Ze skříňe pokračuje ručně rozpínací trn, na který se nakládá svitek vodiče. Mechanický rozpínací systém umožňuje rychlé a snadné naložení na odvíječ. Aby bylo možné používat vysoké napnutí fólie bez jakéhokoli posunutí vodivé fólie na trnu do strany, je povrch čelistí plně vroubkovaný. Odvíječ se může nakládat jeřábem, poté je trn podpořen výkyvným protiložiskem.

Trn odvíječe je brzděný pneumaticky ovládanou kotoučovou brzdovou jednotkou. Napnutí fólie je podle potřeby plynule nastavitelné s ohledem na průřez fólie. Automatický systém kompenzace průměru vinutí udržuje konstantní napnutí fólie v celém rozsahu průměru.

Odvíječ je vybavený přitlačným válcem, který během procesu navíjení zůstává přitlačený ke svitku, čímž brání jejímu povolání. Zmíněné části odvíječe jsou popsány na obrázku 3.1a).

Ve skříni odvíječe vodivé fólie je nainstalována motorem poháněná hřídel převíječe ochranného papíru (viz obrázek 3.1c), který se nachází mezi vrstvami fólie na svitku. Při procesu navíjení je ochranný papír automaticky převíjený a z hřídele ho lze snadno odstranit.



Obrázek 3.1 Zleva dolů a) Popis částí odvíječe b) Umístění odvíječe v konstrukci navíječky c) Převíječ ochranného papíru [17]

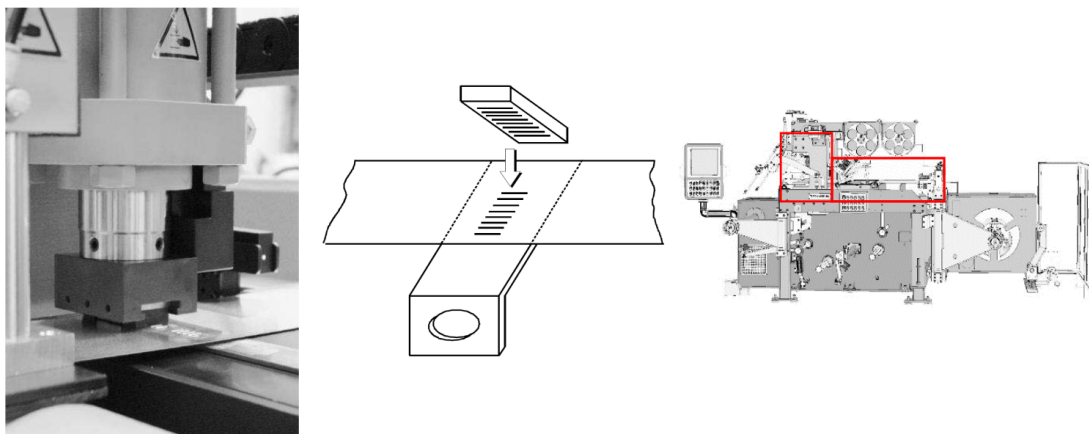
3.1.2 Jednotky na úpravu fólie

Z odvíječe fólie nejprve pokračuje na jednotku pro odstranění otřepů na hranách fólie. Na obě strany jsou přitisknuty dva válečky, které jsou pneumaticky ovladatelné a všechny přečnívající otřepy zarovnávají.

Dále se fólie připravuje na svařování lisováním za studena pro upevnění vývodu. Svaření musí vytvořit dokonalé mechanické i elektrické spojení. K tomu je zapotřebí brousící jednotka, která na fólii v místě svaření odstraní zoxidovanou vrstvu. Po brousící jednotce následuje stanice pro svařování

Jednotka pro svařování lisováním za studena umožňuje spojit hliník s hliníkem, hliník s mědí a měď s mědí. Svařovací jednotka a princip její funkce jsou ilustrovány na obrázcích 3.2a, 3.2b. Svařovací jednotka sestává z robustního ocelového rámu zabudovaného v prostřední části navíjecího stroje. Příčný pohyb a přítlačný proces probíhají automaticky. Před svařením jsou fólie a vývod upnuty pomocí držáků umístěných na levé a pravé straně fólie a plochy, které budou lisované, jsou potřeny pastou, která zabrání přichycení fólie k lisu. Vývody jsou tvořeny z pásovinu obdélníkového průřezu většinou ze stejného materiálu jako je vodič vinutí. S vodičem jsou spojeny po celé šířce vodiče a přečnívající část vývodu bývá dvakrát zahnutá, aby měl vývod dostatečný odstup od jádra. Na konci vývodu jsou většinou vyvrtné díry pro jednoduché připojení pokračujících vodičů.

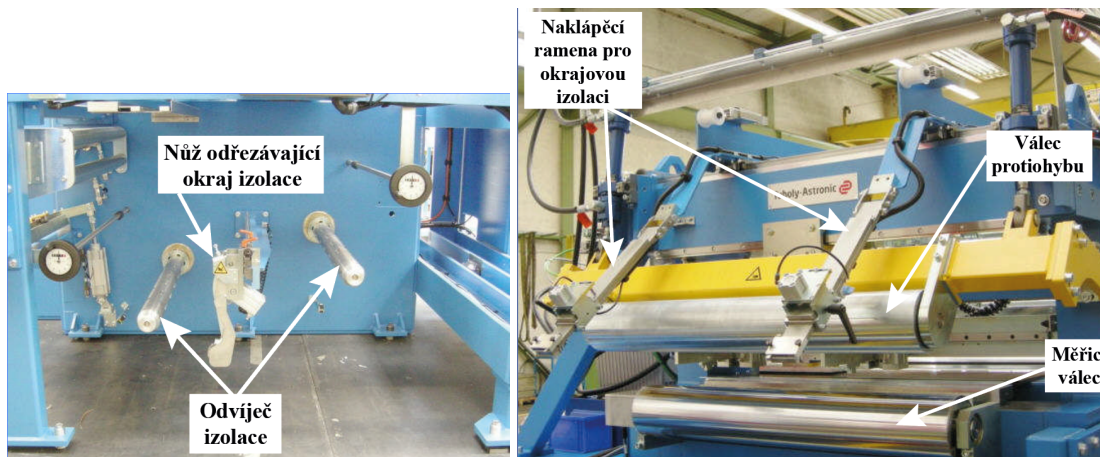
Poloha hran fólie je po zarovnání otřepů hlídána fotočlánkem a v případě posuvu dává pokyn odvíječi pro vyrovnání. Za svařovací jednotkou se dále nachází měřicí válec, který je vybaven enkodérem, pomocí kterého jsou dopočítávány předběžné body zastavení např. pro nalisování vývodů či zasunutí axiálních chladicích kanálů. Nad měřicím válcem je ještě válec pro proti-ohyb fólie. Protěžší ohnutí fólie má tu výhodu, že se fólie mnohem lépe přizpůsobí kolem rohů oválných nebo hranatých vinutí. Několik otáček před dokončením cívky se válec proti-ohybu odsune od fólie, aby nedošlo k nesprávnému vypočtení bodů pro zastavení. Oba válce jsou označeny na obrázku 3.3b).



Obrázek 3.2 Zleva a) Svařovací jednotka b) Ilustrace principu svaření za studena c) Umístění jednotek pro úpravu fólie [17]

3.1.3 Odvíječ izolace

Pod jednotkou na úpravu fólie se nachází rozpínací trn pro naložení role izolačního papíru, což je možné vidět na obrázku 3.3a. Je zde stupnice umožňující přesné nastavení hran, zde se také dá nastavit nůž, který při odvíjení odřezává hranu papíru pro dosažení požadované šířky, jelikož se role vyrábějí jen ve standardizovaných šířkách. Výhodou je značné zredukování naskladněných šířek izolačních papírů. Napínání papíru je zajištěno pneumatickou kotoučovou brzdou, která je regulovaná senzorem měřící průměr role. Stroj může být vybavený i více odvíječi izolace.



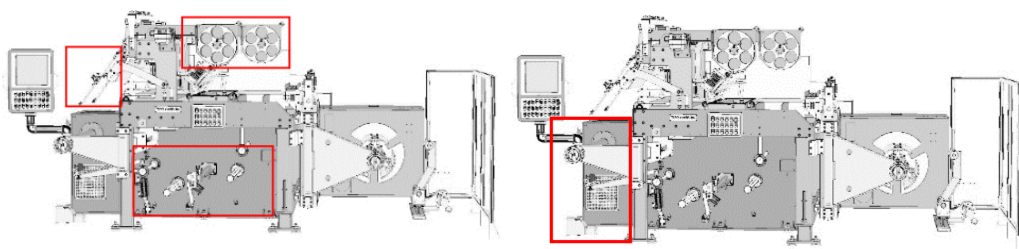
Obrázek 3.3 Zleva a) Popis dolní části navíjecího stroje b) Popis horní části [17]

Další dva odvíječe, tentokrát pro okrajovou izolační pásku, se nacházejí nad jednotkou na úpravu fólie. Oba systémy je možno posouvat ručně do stran za účelem přesného nastavení vzhledem k hranám fólie. Pásky jsou na vinutí přiváděny naklápacími rameny, viz obrázek 3.3b). Umístění zmíněných částí je ilustrováno na obrázku 3.4a).

3.1.4 Navíječ vinutí

Navíječ vinutí (na obrázku 3.4b) je podobně stavěný jako odvíječ fólie umístěný na opačné straně stroje. Skříň navíječe je tvořena pevnou ocelovou konstrukcí. Navíjecí hřídel je usazená v robustních ložiskách. Příruba přivařená k navíjecí hřídeli nese navíjecí trn. Pro zajištění maximálního napnutí je hřídel vybavena výkyvným protiložiskem. Tvar vinutí je udržován přítlačným válcem.

Navíjecí trn se skládá ze dvou půlválcových desek, v jedné z nich je drážka pro uložení vývodu na začátku vinutí. Délka rovné části se zvětšuje podložením těchto desek rozpěrkami. Rovnou část tvoří dvě boční desky jejichž vzdálenost od příruby se opět nastavuje rozpěrkami.

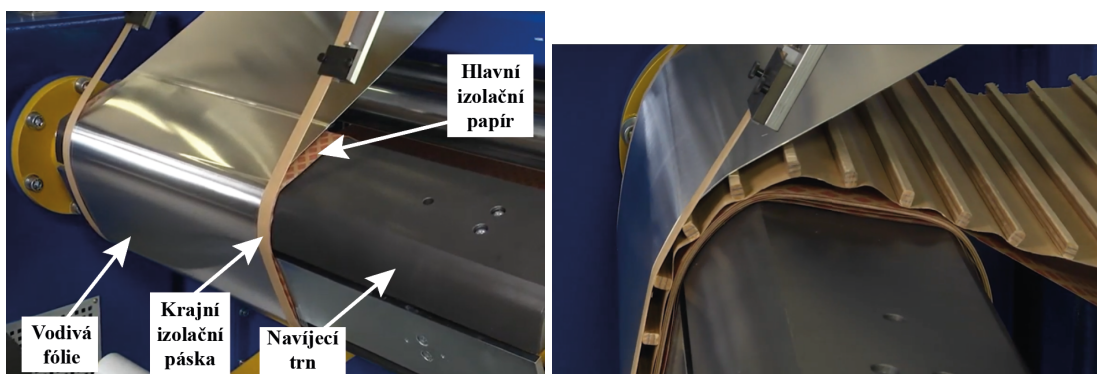


Obrázek 3.4 Zleva a) Umístění částí popsány v kapitole 3.1.3 Odvíječ izolace
b) Umístění navíječe vinutí [17]

3.1.5 Průběh navíjení

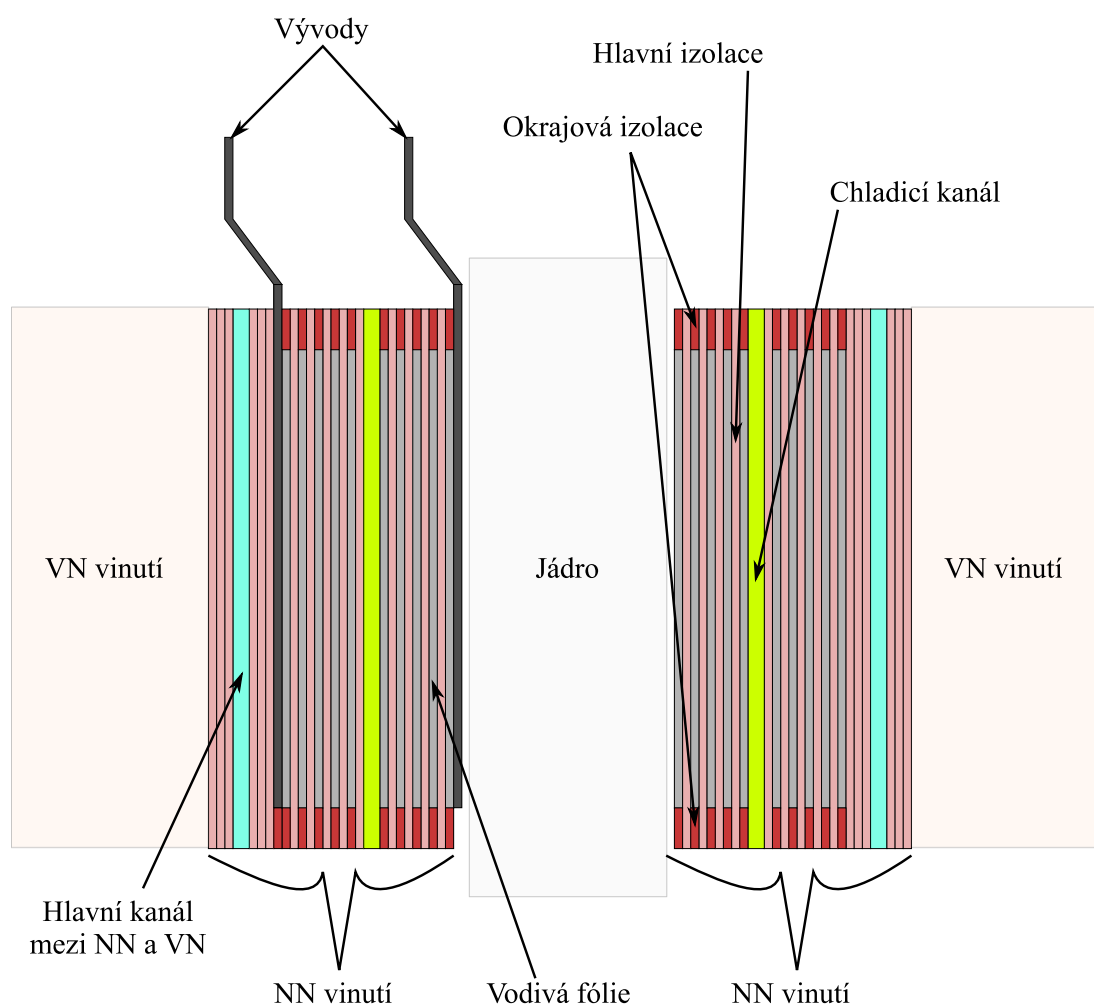
Z odvíječe vodiče se fólie natáhne do jednotky na její úpravu. Její začátek se vybrousí, natře pastou a lisováním za studena se svaří s vývodem. Fólie se dál natáhne až k navíjecímu trnu a vývod se vloží do drážky pro něj určené, čím dojde k uchycení fólie a zajištění požadovaného napnutí. Následně se udělá malá část otáčky a ze spodní části navíjecího systému se vytáhne izolační papír a ten se zastrčí pod fólii tak, aby ho tlak mezi fólií a trnem pevně sevřel. Dále se z horní části navíječky vytáhnou krajní izolační pásy, které vyplní mezery mezi přečnivající hlavní izolací na hranách, protože je širší než vodivá fólie a na obou hranách mají přesah. Vyplnění těchto mezer je vinutí kompletně izolované. Krajní izolační pásy se na začátku navíjení musí k fólii připevnit lepicí páskou. Navíjení je zachyceno na obrázku 3.5a.

Pak už se pokračuje v plynulém otáčení navíjecího trnu, dokud se nevytvoří potřebný počet závitů nebo dokud není ve vinutí potřeba vytvořit axiální chladicí kanál (u větších výkonů). V takovém případě musí po zastavení obsluha vložit mezi začínající a poslední navinutou vrstvu podložku s nalepenými lištami (zobrazena na obrázku 3.5b), které vytvoří mezeru mezi těmito závity. Novým závitem se zpomaleně a kontrolovaně podložka převine, pak je možné pokračovat v navíjení se standardní rychlostí. Podrobněji jsou chladicí kanály rozebrány v kapitole 0.



Obrázek 3.5 Zleva a) Průběh navíjení NN vinutí b) Vkládání chladicího kanálu [17]

Těsně před dokončením posledního závitu navíjení zastaví a ve vypočteném místě se opět svaří vývod s fólií, tak aby na vinutí byl přesně nad prvním vývodem. Po svaření koncového vývodu se může rovnou svařit další vývod, který bude tvořit začátek nového vinutí. Fólie mezi těmito dvěma vývody se rozdělí elektrickými nůžkami, kterými je navíječka také vybavena. Když je splněn požadovaný počet závitů, okrajová izolace se odstříhne, aby korespondovala s koncem vodivé fólie a zde se opět přilepí k vinutí. Na vnější vývod se ještě přidělá 1 mm tlustá izolační lepenka, která je o něco širší než vývod a zasahuje i mimo vinutí. Její přítomnost zvyšuje elektrickou pevnost mezi NN vývodem a vinutím VN, především hrany vývodu jsou velmi náchylné na průraz. Celé vinutí se následně převine několika závity hlavním izolačním papírem pro zabezpečení dostatečné elektrické pevnosti mezi NN a VN vinutím. Podobně jako chladicí kanál uvnitř vinutí, se v polovině izolace mezi VN a NN vkládá hlavní chladicí kanál, kterým proudí olej. Ten nejen, že obě vinutí chladí, stejně jako kanály v jednotlivých vinutích, ale také elektricky izoluje. Po dokončení poslední otáčky izolace se papír odstříhne a konec se na vinutí přilepí lepicí páskou, která zatím stačí, jelikož se přímo pokračuje s navíjením VN vinutí. Rozmístění izolace, kanálů, vývodů a vodiče je demonstrováno na obrázku 3.6.



Obrázek 3.6 Ilustrace řezu NN vinutím s popisem jeho částí

3.2 Navíjení vinutí vysokého napětí

U distribučních transformátorů se často používají kromě výše popsaných fóliových vinutí i jiné typy provedení vinutí, která se u větších transformátorů nenacházejí. Kvůli relativně malému průřezu jádra, které je výsledkem nízkých hodnot kVA, je napětí na závit obvykle velmi nízké, takže pro vinutí VN bude vyžadován značný počet závitů. Proud je však také nízký a potřebný průřez vodiče vychází malý. Vodič pro takové vinutí bývá nejčastěji kruhového nebo oválného průřezu se smaltovaným povrchem, což zajišťuje izolaci mezi sousedními závity. Jak uvádí [18], vodič kruhového průřezu nemůže být vinut do deskového plynulého vinutí, takže se nejčastěji vine jako polohové (vrstvené) vinutí.

Největší problém z hlediska izolace nastává mezi začátkem polohy (vrstvy) a koncem následující polohy, což jsou místa s největším napěťovým namáháním. Dříve se používala mezipolohová izolace jedné tloušťky po celé výšce vinutí, dnešní technologie však umožňuje progresivní mezipolohovou izolaci, kde je mezi přechodem dvou poloh izolace nejtenčí a mezi začátkem a koncem těchto sousedících poloh je izolace nejtlustší, což ve výsledku sníží celkovou šířku vinutí a rozteč sloupků jádra může být menší. V řezu má mezipolohová izolace tvar klínu, viz obrázek 3.10. Dále je potřeba zohlednit rozložení impulsního napětí mezi závity, protože vlivem indukčnosti a mezizávitových kapacit je rozložení nelineární a závity na začátku či konci vinutí jsou namáhány mnohem více než ve středních polohách. Proto tloušťka izolace mezi několika prvními a posledními polohami musí být větší než ve zbytku vinutí. Kromě mezipolohové izolace je ještě potřeba vinout izolaci na koncích vinutí podobně jako u NN vinutí. Dnešní technologie používá stejnou izolační pásku na tvorbu jak mezipolohové, tak koncové izolace. Šířka zvolené pásky pak musí být ideálně stejně velká jako je šířka koncové izolace nebo menší.

Podobně jako u NN vinutí se u VN vinutí dají tvořit axiální chladicí kanálky. Navíc u VN vinutí se běžně musí vyvést odbočky $\pm 2 \cdot 2,5 \%$, kde se vodič musí jedenkrát stříhat, aby se vinutí rozdělilo na dvě sekce, a čtyřikrát vyvést ohnutý drát, což hodně zpomaluje proces navíjení. Z těchto důvodů je VN vinutí technologicky mnohem náročnější a z časového hlediska delší.

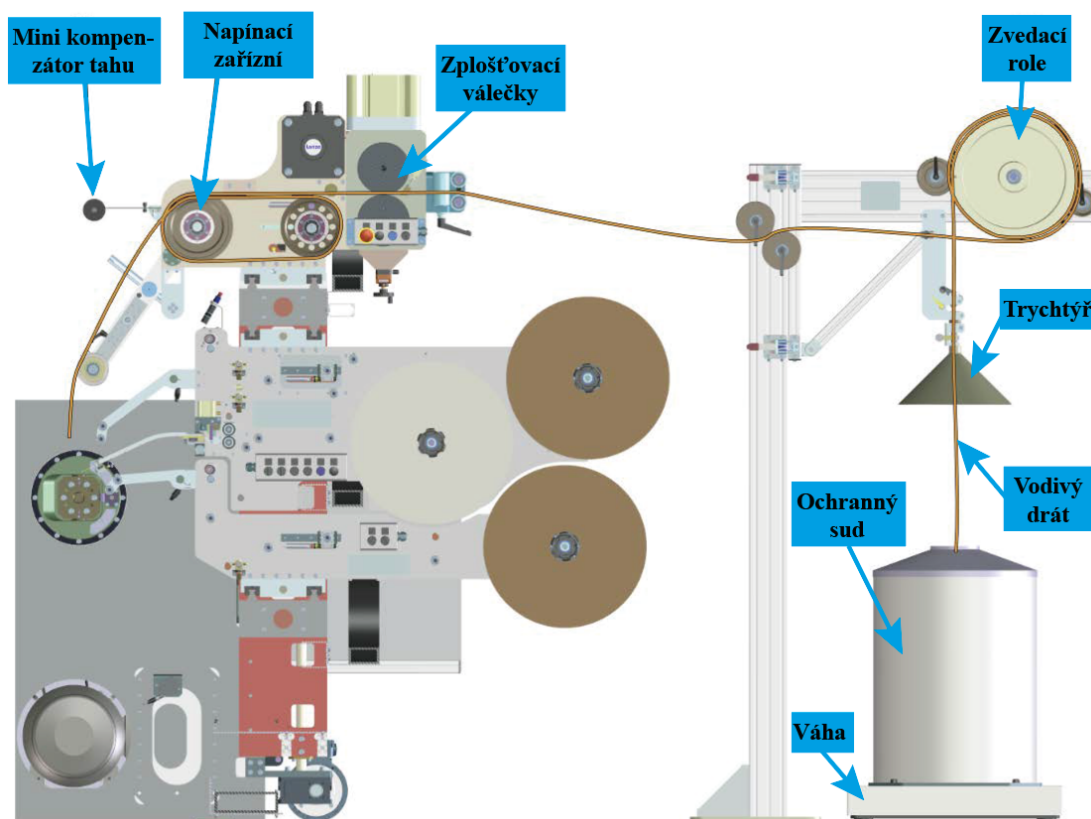
Výrobou a vývojem navíječek, které zajišťují zmíněný proces navíjení VN vinutí, se zabývá již zmíněná firma Tuboly-Astronic AG nebo německá firma BR Technologies GmbH & Co. KG. Od posledního zmíněného výrobce používá vrstvou navíječku AM 3150 VPS-3 i Elpro-Energo s.r.o. a na tomto modelu bude popsána její funkce a postup navíjení [19].

3.2.1 Přivedení drátu

Buben s vodivým drátem je umístěn do ochranného sudu, v jehož horní podstavě je díra, kterou je drát vyveden na zvedací jednotku. Tu představuje trychtýř, který drát vyrovnává a vede na zvedací roli, na které je několik otáček drátu a ty jsou přidržovány dvěma přítlačnými válci. Ze zvedací jednotky je drát dále veden přes podpěrné kladky mezi zplošťovací válečky. Mezera mezi zplošťovacími válečky je nastavitelná, takže drát je po

průchodu mezerou zploštěn a má menší tloušťku, zlepšuje se tím činitel plnění VN vinutí. Výsledkem je méně použitého materiálu, menší vinutí a tím nižší náklady. Vzdálenost mezi zplošťovacími válečky je nastavitelná pomocí vřeten a možné zploštění závisí především na tvrdosti materiálu vodiče a pevnosti smaltu na jeho povrchu. V případě hliníkového vodiče může být zploštění až 45 % a v případě měděného vodiče až 30 %. Zploštění však musí být minimálně 10 %, protože díky tlaku na drát, válečky tvoří potřebné napnutí drátu pro navíjení. Na vytvoření pnutí se podílí také dynamické napínací zařízení, které udržuje konstantní napnutí drátu i při navíjení nekruhového vinutí při vysoké rychlosti. Pnutí může být počítáno automaticky nebo zvoleno obsluhou. V případě obzvláště tenkého drátu je navíjecí stroj ještě vybavený mini kompenzátořem tahu drátu [19]. Celá sestava je popsána schématem na obrázku 3.7.

Zvedací jednotka je vybavena čidlem pro detekci přerušení drátu. V případě přerušení drátu stroj zastaví. Konec přerušeného drátu nesmí projít přes zplošťovací válečky, protože by drát na vinutí přišel o pnutí. Nový drát se musí napojit tedy ještě před tím. Pro detekci konce drátu slouží také váha, na které je položen ochranný sud s bubnem drátu, a váha hlásí aktuální stav podle hmotnosti zbylého drátu.



Obrázek 3.7 Schéma přivedení drátu k vinutí vrstvou navíječkou [19]

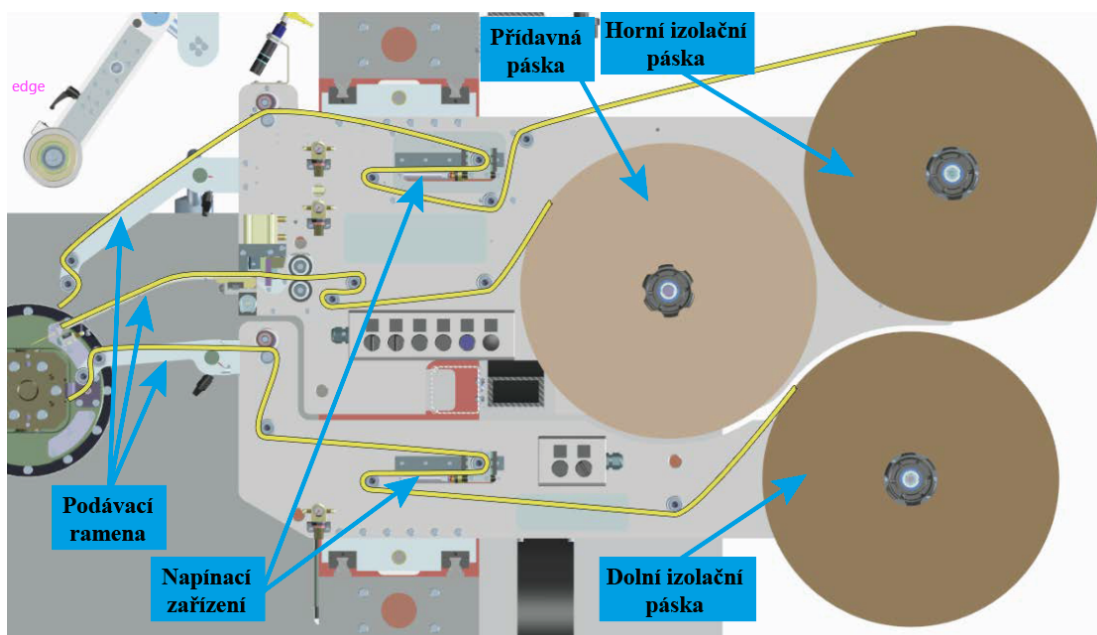
3.2.2 Jednotka pro navíjení izolačních pásků

Jednotka pro navíjení izolačních pásků je navržena pro vinutí progresivně tvarované mezipolohové izolace. V závislosti na návrhu vinutí, je možné použít jednu nebo dvě izolační pásky zároveň a v případě použití dvou izolačních pásků, je možnost přidat ještě dodatečnou třetí pásku při vinutí koncové izolace. Všechny pásky musí mít stejnou šířku. Mezi první a druhou izolační páskou se dá zvolit offset, díky kterému je vinutá izolační vrstva hladší. Svitky izolační pásky jsou připevněny vzájemně pod sebou na konstrukci, která pásky vede až k vinutí. Konstrukce pro horní a dolní pásku jsou od sebe oddělené, na horní je uchycena také přídatná třetí páska. Obě konstrukce jsou servopohonem pohybovány v příčném směru, aby se mohly měnit svoje místo při navíjení po celé výšce vinutí [19]. Schéma pro navíjení izolačních pásků je na obrázku 3.8.

Izolace je vinuta zároveň s vodičem, což umožňuje automatické navíjení. Aby byla splněna podmínka pro plně automatický režim, je nutné, aby navržená koncová a v součtu i mezipolohová izolace šla vytvarovat stejným počtem otáček izolace jako má poloha počet závitů drátu nad touto izolační vrstvou. Při návrhu se dá tento požadavek splnit vhodnou volbou tloušťky izolační pásky. Pokud jsou použity dvě pásky, obě musí mít stejnou tloušťku, aby byly navíjeny se stejným napnutím. Všechny potřebné manuální úkony prováděné obsluhou stroje, jako je vyvádění odboček či vkládání chladicích kanálů, jsou také zahrnuty v navíjecím procesu. V takovém případě navíječka automaticky zastaví ve všech nezbytných bodech a upozorní obsluhu.

Navíjení umožňuje specifikovat parametry každé polohy individuálně, což umožní navíjet mezipolohovou izolaci v každé mezipoloze s rozdílnou tloušťkou, která zohledňuje napětové namáhání v případě impulsní vlny. Tloušťka izolační pásky, případně použití dvou nebo jen jedné z nich, je dáno mezipolohou s největší tloušťkou, což je nejčastěji první nebo poslední mezipoloha ve vinutí. Pokud návrh v dalších mezipolohách vyžaduje menší vrstvu mezipolohové izolace, stroj přechází do poloautomatického režimu, protože obsluha musí v určitém bodě izolační pásku přestříhnout a při navíjení další polohy opět přilepit, což snižuje rychlost navíjení. Nebo se dá v mezipoloze s nejtlustší izolací použít ještě třetí páska, která se automaticky vkládá mezi dvě hlavní izolační pásky při tvoření koncové izolace, a při dokončení konce je automaticky odstřižena. V dalších vrstvách se použité množství třetí pásky snižuje, takže se tím koriguje výsledná tloušťka celé mezipolohy bez zásahu obsluhy, takže je zvýšená rychlost, plynulost a ušetření nákladů za méně lepidla.

Třetí dodatečná páska pak může mít libovolnou tloušťku nezávislou na hlavních páskách. Konstantní napětí pásek je zajištěno dynamickým napínacím zařízením, které kompenzuje svojí polohou nekruhový tvar vinutí.



Obrázek 3.8 Schéma jednotky pro navíjení izolačních pásků [19]

3.2.3 Navíjecí trn

Rozpínací trn je navržen pro vinutí oválného tvaru. Skládá se ze základního trupu a z pláště, který je vyměnitelný [19]. Rozsah rozpětí je manuálně nastavitelný. Trn je přichycený na výkyvném ložisku a z druhé strany je podpírán koníkem. Velmi se podobá trnu z NN navíječky. Je možné jej vidět na obrázku 3.9.

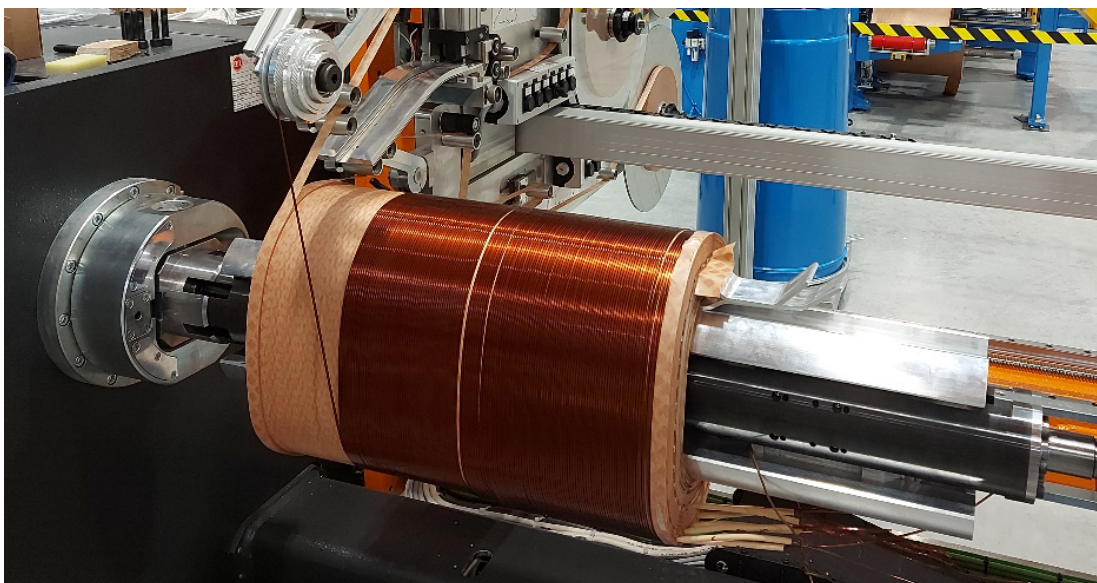
3.2.4 Průběh navíjení

Hotové vinutí NN se přenese (většinou jeřábem s použitím upínacích kurtů, vinutí malých výkonů se dají přenést ručně) na vykývnutý trn VN navíječky a trn se roztáhne, čímž se vinutí zafixuje.

Jako první se navine jen koncová izolace bez drátu. Izolační páska se přilepí na okraj vinutí lepicí páskou a udělá se pár otáček až výška této izolační vrstvy dosáhne šířky drátu. Poté se izolační páska přeruší a jejich konec přilepí. Pak se pokračuje vinutím jen drátu bez izolačních pásek. Asi 30 cm počátku drátu se nechá vyvedeno ven kolmo na konec vinutí jako vývod a za koncovou izolací se ohne do opačného směru zpátky a připevní se. Vyvedená část drátu se nasouká do izolační trubičky. Následně se začne navíjet první poloha, Stroj navíjení zastaví až pár otáček před koncem první polohy, kdy se opět přilepí izolační páska, aby se vytvořila koncová izolace na druhém okraji vinutí, s tím, že v momentě, kdy se udělá poslední závit první polohy, koncová izolace je dokončena už i pro druhou polohu. Když se začne drátem vinout druhá poloha, izolační páska podjedou drát a současně začnou vinout progresivní mezipolohovou izolaci a to tím, že postupně se vrstvení závitů pásek zhušťuje až na dalším okraji vinutí vytvoří koncovou izolaci pro druhou a třetí polohu. Tento postup je ilustrován na obrázku 3.10.

Jedná se tedy již o plně automatický režim a stejným způsobem jsou vinuty všechny další polohy, dokud není požadavek pro vyvedení odbočky nebo vložení chladicího kanálu.

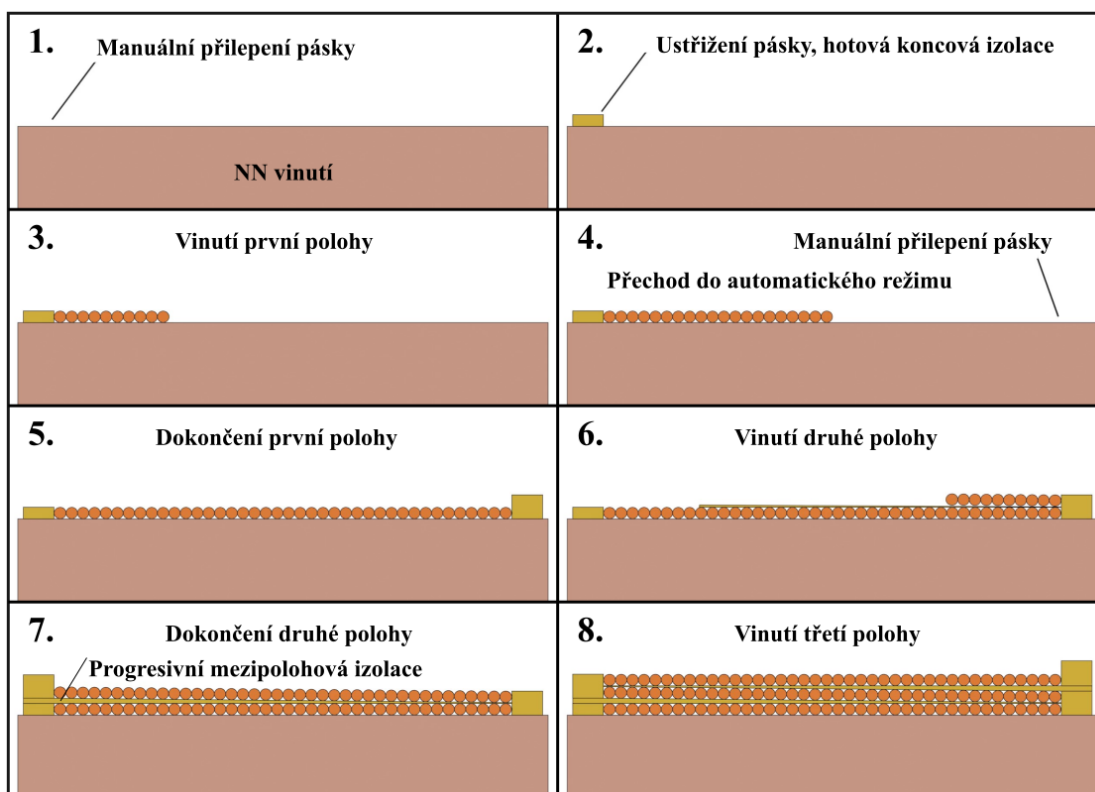
Pokud se tvoří chladicí kanál, je zde výjimka na motání koncové izolace, protože když se dokončí všechny závity drátu v poloze, je dokončena koncová izolace jen pro tuto polohu, v běžném režimu už je namotaná i pro polohu následující, to by však vytvořilo nerovnost pro chladicí kanál. Až je poloha před chladicím kanálem dokončena, obsluha vloží stejnou podložku s lištami jako pro vinutí NN, která kanál vymezí. Dál už navíjení pokračuje v běžném režimu, jen se musí manuálně namotat koncová izolace páskou na okraji, kde koncová izolace kvůli kanálu chybí.



Obrázek 3.9 Proces navíjení VN vinutí

V momentě, kdy se vyvádí odbočky, musí obsluha potáhnout dostatek drátu z podavače, aby ho mohla vyvézt cca 30 cm mimo okraj vinutí, tam drát ohne a vrací ho zpátky na místo, kde se pokračuje s vinutím závitů. Vyvedený drát se vloží do izolační trubičky a drát se přilepí v místech vyvedení od posledního závitu a na konci vinutí. V těchto místech je také obložen dalším izolačním papírem. Všechny odbočky na konci vinutí nejsou vyváděny po celém obvodu, ale na protější straně s vývody NN vinutí a také blízko sebe s malou roztečí. Jsou řazeny podle zapojení v přepínači odboček. Prostřední odbočky se vytvoří jako jedna z předchozích odboček, drát je však rozstřížen a každý konec je vložen do samostatné izolační trubičky. Odbočky je potřeba navrhnout tak, aby závit, po kterém jsou vyvedeny nebyl úplně u kraje, jinak vývod nejde dobře připevnit.

Poslední poloha nemusí mít počet závitů zasahující až na konec vinutí, takže koncová izolace se může vytvořit v jakékoliv výšce vinutí. Jakmile se navine poslední závit, drát se vyvede stejně jako jeho začátek či odbočky. Pak už se jen celé vinutí obmotá určitou vrstvou z pásek pro vytvoření vnější izolace. Navíječka v průběhu procesu navíjení je na obrázku 3.10.



Obrázek 3.10 Postup navíjení pro první tři polohy [19]

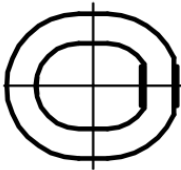
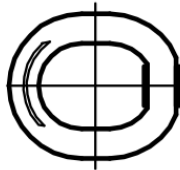
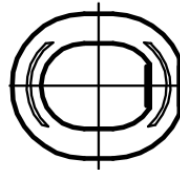
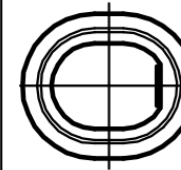
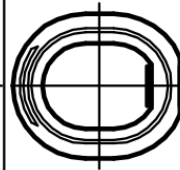
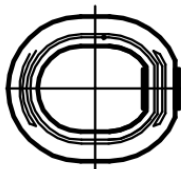
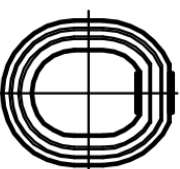
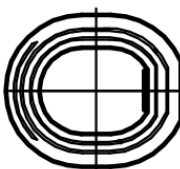
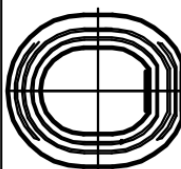
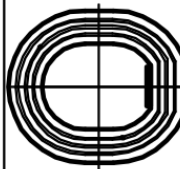
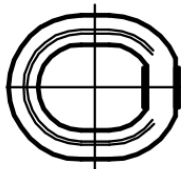
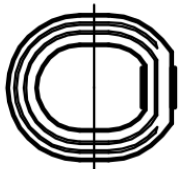
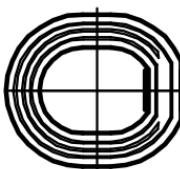
3.3 Chladicí kanály

Chladicí kanály se dají rozdělit podle umístění na hlavní kanál, který se nachází mezi vinutími a na kanály ve vinutích NN nebo VN. Principiálně jsou kanály vytvořeny stejně a to tak, že se mezi vrstvy vodiče nebo izolace vloží pospojované tyčky připomínající žebřík. Tyčky mají obdélníkový průřez se zaoblenými hranami, aby se zabránilo poškození izolace či vodiče v přiléhajících vrstvách i případě působení velkých radiálních tlaků. Tyčky jsou vyrobené ze zatepla slisované celulózy [20].

Tyčky hlavního kanálu jsou nalepeny na izolačním papíru. Tloušťka hlavního kanálu závisí převážně na napětovém rozdílu mezi vinutími jedné fáze, který podle tabulek určuje elektrickou vzdálenost mezi nimi. Tloušťky kanálu jsou nabízeny v celých milimetrech, takže elektrická vzdálenost mezi vinutími se dodatečně koriguje přidáním či ubráním závitů NN izolačního papíru.

Pro chladicí kanály ve vinutích jsou tyčky spojené jen dvěma nebo třemi úzkými páskami, konstantně se používá tloušťka 5 mm. Pro popis kanálů ve vinutí, je zapotřebí rozdělit vinutí na tři sekce. Půlkruhová část na straně, kde se vyskytují NN vývody se označuje jako sekce C, rovná část jako sekce D a zbylá půlkruhová část jako sekce A. Ve vinutí NN se používá 13 různých konfigurací chladicích kanálů zobrazených na obrázku 3.11. Pro jejich rozlišení jsou zavedena následující označení [4]:

- 1) Bez kanálu
- 2) P1 – kanál se vyskytuje jen v sekci A, kterou dělí přibližně na poloviny šířky.
- 3) P2 – kanál je v sekcích A a C, které dělí na poloviny šířky.
- 4) T1 – kanál je po celém obvodu přibližně v polovině.
- 5) T1P1 – po celém obvodu je kanál v jedné třetině, v sekci A je i druhý kanál ve dvou třetinách šířky vinutí.
- 6) T1P2 – stejně jako předchozí, druhý kanál je i v sekci A.
- 7) T1T1 – po celém obvodu jsou dva kanály, které dělí vinutí na třetiny šířky.
- 8) T1T1P1 – vinutí je děleno na čtvrtiny šířky, v prvních dvou jsou kanály po celém obvodu, v sekci A je i třetí kanál.
- 9) T1T1P2 – třetí kanál přibude i v sekci C.
- 10) T1T1T1 – po celém obvodu jsou tři kanály.
- 11) T11 – Kanál je v sekcích A a D.
- 12) T12 – Po celém obvodu jsou dva kanály, jen v sekci C jeden chybí.
- 13) T13 – Po celém obvodu jsou tři kanály, druhý kanál v sekci C chybí.

1	2	3	4	5
				
None	P1	P2	T1	T1P1
6	7	8	9	10
				
T1P2	T1T1	T1T1P1	T1T1P2	T1T1T1
11	12	13		
				
T11	T12	T13		

Obrázek 3.11 Konfigurace chladicích kanálů ve vinutích [4]

Kanály ve vinutí VN se používají se stejnými konfiguracemi jako ve vinutí NN, jen bez použití posledních tří vyjmenovaných konfigurací, které zohledňují výskyt vývodů. Vývody totiž v tomto místě vinutí rozšiřují. Konfigurace zahrnující P1 nebo P2 jsou výhodné z toho důvodu, že nezvětšují rozteč sloupků jádra, ale vinutí roste jen do prostoru mimo další fáze.

3.4 Izolační papír a vytvrzení vinutí

Izolační papír, který je použitý při navíjení obou vinutí je z celulózy neběleného síranu. Povrch je oboustranně posetý malými čtverečky z pryskyřice. Ty jsou rozmístěny tak, že jejich úhlopříčky jsou kolmé a rovnoběžné na směr navíjení. Celkově je pak 36% plochy pokrytou epoxidovou pryskyřicí, viz obrázek 3.12a. Izolační papír nebo také chladicí kanály nabízí např. německá firma Krempel GmbH [20].

Po vytvrzení v peci se částečný pryskyřicový povlak zpevní a sváže vodič s izolací, což přinese mechanické zpevnění tvaru vinutí. Povrch papíru je nelepivý a vodič i papír musí být navíjeny s adekvátním napětím, aby vinutí bylo co nejkompaktnější. Zpevnění je pak dostatečně silné na to, aby vinutí bylo schopné odolat jak axiálním, tak radiálním zkratovým silám. Papír je navíc rychle a snadno impregnován transformátorovým olejem, což minimalizuje hrozbu elektrického průrazu.

Po dokončení navíjení VN se vinutí sundá z trnu a následně musí být staženo dvěma ocelovými U-profilů, které se přiloží na rovnou část vinutí a vzájemně se sešroubují, aby se zachoval požadovaný oválný tvar, jak je ukázáno na obrázku 3.12b. Bez stažení má jinak vinutí tendenci změnit svůj průřez na kruhový tvar vlivem vnitřních napínacích sil. Po stažení se vinutí vloží do pece, kde je ohříváno na teplotu 130 °C v průběhu 3 hodin, čímž se vytvrdí pryskyřice v izolačním papíru a vinutí získá maximální pevnost.



Obrázek 3.12 Zleva a) Izolační papír s pryskyřicí [20] b) Stažené vinutí připravené na vytvrzení v peci

4. NÁDOBA A SESTAVENÍ TRANSFORMÁTORU

4.1 Výroba nádoby

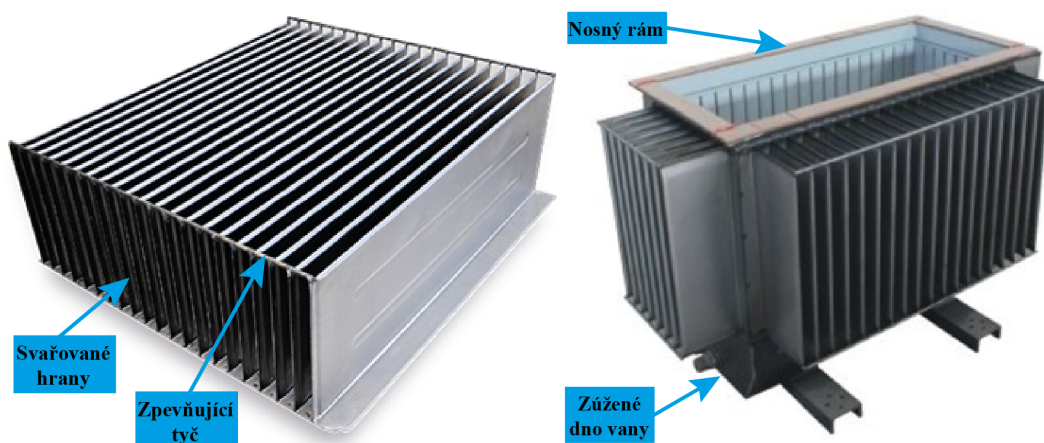
Základem pro výrobu nádoby je stroj pro výrobu vlnovce. Vlnovec na každé stěně se dělá zvlášť, viz obrázek 4.1a. Bývá zvykem, že vlny na straně vývodů VN mají větší délku než na ostatních stěnách. Na ostatních stranách bývá nejběžnější, že všechny vlny jsou stejně dlouhé a mají stejnou rozteč. Stěny nelze dělat bez vln, protože vlny kromě zvětšení chladičích plochy mají i zpevňovací funkci, protože plech vlnovce mívá tloušťku jen 1,25 – 1,5 mm. Moderní stroj (nabízí např. opět Georg GmbH) pro výrobu vlnovce odvíjí ocelový plech ze svitku a v dalších fázích ho ohýbá do požadovaného tvaru vln jako harmoniku a následně automaticky svařuje jeho hrany spolu s ocelovými tyčemi, které jsou uchyceny na koncích vln a fixují jejich tvar [4].

Další nezbytnou součástí je vana, která je pro zajištění pevnosti celé nádoby z mnohem tlustšího plechu, cca 5 mm. Dno vany, ve výšce, kde se vyskytuje jen jádro, a ještě nezačalo vinutí, má zúženou šířku oproti šířce nádoby kolem vinutí.

Předposlední částí je nosný rám (viz obrázek 4.1b), který drží tvar vlnovce stejně jako vana, ale z hora. Proto je z plechu o podobné tloušťce jako vana. Na rám se pak kromě těsnění nasazuje poslední část, a to je víko, ve kterém jsou průchodky, háky pro zavěšení aktivní části transformátoru a další, např. měřicí přístroje. Víko plní nosnou funkci aktivní části, ta není nikterak s vanou spojená.

Svařování všech dílů provádí svařovací roboti, kromě víka, které se montuje zvlášť, nejprve na aktivní část. Následně je nádoba testována na těsnost. Vnitřek nádoby je vystříkán speciální tekutinou, která má ještě nižší viskozitu než olej a v ultrafialovém záření fosforuje. Po důkladné kontrole těsnosti je nádoba očištěna od špatných svárů a opískována. Následuje antikoroziční úprava.

Ta se skládá ze dvou vrstev základní barvy 35 μm a dvou vrstev krycích 35 μm . Všechny vrstvy dohromady mají 140 μm . Standardní odstín zelené RAL 7033 nebyl zvolen náhodně. Spektrum vyzařování tepla je při běžné pracovní teplotě transformátoru do 100 °C u této barvy nejefektivnější. Používají se vodou ředitelné barvy, které daleko méně zatěžují životní prostředí. Nádoby nejsou klasicky stříkány, ale namáčeny v obrovské lázni. Po vysušení jsou nádoby připraveny ke spojení s aktivní částí. Na požádání mohou být nádoby dodávány i v zároveň pozinkované formě.



Obrázek 4.1 Zleva a) Vlnovec na jedné stěně [21]
b) Celá nádoba na olej bez víka [22]

4.2 Finální montáž

Po dokončení výroby jednotlivých částí se vytvrzená vinutí nasadí na sloupky jádra ve tvaru E pomocí kurtů. Na vnitřní průměr vinutí se po celém obvodu až na NN vývod ještě přidá 1 mm tlustá izolační lepenka, která izoluje jádro od vinutí a pomáhá vinutí vycentrovat. Vinutí musí být natočeno NN vývodem na stranu ubraných plechů jádra. Při správném dodržení tvaru vinutí je mezi vinutím a jádrem malá mezera, pokud se vinutí musí na sloupek natlačit silou, může dojít k poškození izolace a ke galvanickému spojení jádra a NN vinutí. Vinutí dosedá na podložky položené na spodní straně jha, podložky jsou podobné chladicím kanálům. Na stranách, kde už jho nezasahuje, sedí vinutí na podpěrkách z tvrdé celulózy uchycených na stahovací konstrukci. Do mezer mezi stupni jádra a vinutím se vloží dřevěné tyčinky, které vinutí zároveň zafixují a vycentrují. Na horní konec vinutí se také připraví podložky a podpěrky a mezi fáze se ještě přidává izolační bariéra z tlusté izolační lepenky.

Následně se doskládá horní jho jádra, stejným způsobem jako dolní, tedy zakládáním jednotlivých paketů a celé se zpevní horní stahovací konstrukcí. Horní i dolní stahovací konstrukce se navzájem stáhne ocelovými pásky na každém sloupku, kde se pásek protáhne mezerou mezi vinutím a jádrem. Stažení pásku tak zároveň odtlačuje vinutí od jádra.

Jakmile je dokončeno jádro, může se horní stahovací konstrukce přichytit na háky ve tvaru T na víko nádoby. Ocelové pásky a stahovací konstrukce jsou schopné nést celou aktivní část, která je zavěšená na víku nádoby. Kromě toho se dokončí veškerá elektrická zapojení, vývody z vinutí se připojí na průchodky, odbočky z VN vinutí na přepínač odboček a zemnicí pásek, který se vloží mezi plechy jádra.

Následně se provede odstranění zbytkové vlhkosti (vlivem vzdušné vlhkosti) celé aktivní části nízkofrekvenčním sušením, které je založeno na průtoku nízkofrekvenčního proudu vinutími (až 300 A při 0,5 Hz) a ta jsou vlivem ohmických ztrát ohřívána. Izolace

je velkým rezervoárem vody. Voda v izolačním systému olejového transformátoru je nepříjemná ze dvou důvodů. Voda snižuje elektrickou pevnost izolací a je zdrojem kyslíku, který oxiduje a zkracuje životnost transformátoru [23].

Po vysušení se aktivní část s víkem vloží do nádoby a nádoba se může plnit olejem. Plnění musí probíhat ve vakuu a pro tento účel existují speciální plničky, vyráběné např. německou firmou Hedrich GmbH. Nádoba je olejem zaplněná až po víko. Nejběžněji se transformátory plní neinhibovaným minerálním transformátorovým olejem z kategorie hluboce hydrogenovaných izolačních olejů, který se skládá hlavně z hydrogenačně upraveného lehkého naftenického destilátu. Ten se získává se z naftenické ropy. Jeho největší nevýhodou je jeho hořlavost a pomalý biologický rozklad. Kvůli riziku zamoření země, půdy a vody se musí u větších výkonů instalovat záchytná olejová jímka. Při zvýšených teplotách se uvolňují hořlavé výpary. Teplota vzplanutí je 144 °C, teplota samovznícení je větší než 280 °C. Dřívější typy od firmy Shell jsou přesně tento typ oleje (neinhibovaný olej nese označení U). Použit se také dá ale i inhibovaný olej, který navíc obsahuje i malé množství antioxidantu. Nízkoinhibovaný olej nese označení T (antioxidant do 0,08 %) a inhibované s označením I (antioxidant nad 0,08 do 0,4 %), druhý typ je např. od britsko-nizozemské firmy Royal Dutch Shell olej Diala S4 ZX-I nebo Nytro Lyra X od švédské firmy Nynas [24].

5. NÁVRH OLEJOVÉHO DISTRIBUČNÍHO TRANSFORMÁTORU

Celý návrh transformátoru závisí na parametrech, které by měl výsledný stroj splňovat. Tyto parametry můžeme označit jako vstupní a závisí na požadavcích zákazníka nebo jsou dané normami.

Vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 5.1, kde jsou uvedeny i hodnoty zadané pro tuto práci. Hodnoty jmenovitých výkonů, jmenovitých napětí a odpovídajících nejvyšších provozních a zkušebních napětí jsou definovány v normě ČSN EN 50588-1 ED.2 [25]. Limity pro jmenovité ztráty jsou stanoveny v již zmíněném úředním věstníku EU 548/2014 [2]. Jmenovité napětí nakrátko, podobně jako skupiny zapojení, hodinové číslo, počet a rozsah odboček na VN vinutí, je zadáváno zákazníkem, avšak v drtivé většině jsou zadány stejně jako v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1 Vstupní parametry pro návrh transformátoru

Parametr	Značení	Jednotka	Hodnota
Jmenovitý zdánlivý výkon	S_n	[kVA]	630
Jmenovité napětí na straně NN	$U_{n,NN}$	[V]	400
Jmenovité napětí na straně VN	$U_{n,VN}$	[V]	22000
Jmenovitá frekvence	f_n	[Hz]	50
Počet fází	m	[-]	3
Jmenovité napětí nakrátko	u_k	[%]	4
Eco design	ED	[-]	1. stupeň
Jmenovité ztráty naprázdno	P_{on}	[W]	600
Jmenovité ztráty nakrátko	P_{kn}	[W]	6500
Skupina zapojení na straně NN	G_{NN}	[-]	y
Skupina zapojení na straně VN	G_{VN}	[-]	D
Hodinové číslo	HC	[-]	1
Nejvyšší provozní napětí na straně NN	$U_{m,NN}$	[kV]	1,1
Nejvyšší provozní napětí na straně VN	$U_{m,VN}$	[kV]	25
Střídavé výdržné zkušební napětí na straně NN	AC_{NN}	[kV]	3
Střídavé výdržné zkušební napětí na straně VN	AC_{VN}	[kV]	50
Impulsní výdržné zkušební napětí na straně NN	LI_{NN}	[kV]	0
Impulsní výdržné zkušební napětí na straně VN	LI_{VN}	[kV]	150
Počet odboček	n_{odb}	[-]	5
Rozsah odboček	r_{odb}	[%]	2krát $\pm 2,5$

Ze zadaných parametrů bude proveden návrh a výpočet jednotlivých částí transformátoru v následujících podkapitolách výhradně podle [26].

5.1 Výpočet jmenovitých napětí a proudů ve vinutích

Dimenzování jednotlivých vinutí závisí na jejich skupině zapojení, od kterého se odvíjí velikost napětí na jedné fázi vinutí, a také velikost proudu, který vodičem vinutí teče při jmenovitém zatížení.

Jelikož vinutí NN je zapojeno do hvězdy (y), což bývá nejčastější varianta, je na něj připojeno jmenovité fázové napětí $U_{n,f1}$ a je nutné jej ze zadaného sdruženého napětí $U_{n,NN}$ přepočítat i s dosazením ve vztahu

$$U_{n,f1} = \frac{U_{n,NN}}{\sqrt{m}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230,940 \text{ V}, \quad (5.1)$$

zatímco vinutí VN je zapojeno do trojúhelníku (D), takže napětí na jedné fázi $U_{n,f2}$ je stejné jako zadané sdružené $U_{n,VN}$, jak ukazuje následující vztah

$$U_{n,f2} = U_{n,VN} = 22000 \text{ V}. \quad (5.2)$$

Z těchto napětí $U_{n,f1}$ a $U_{n,f2}$ se proudy $I_{n,f1}$ ve vinutí NN a $I_{n,f2}$ ve vinutí VN dopočítají jednotným vztahem pro obě vinutí ze zadaného jmenovitého výkonu S_n následovně

$$I_{n,f1} = \frac{S_n}{m \cdot U_{n,f1}} = \frac{630000}{3 \cdot 230,940} = 909,327 \text{ A}, \quad (5.3)$$

$$I_{n,f2} = \frac{S_n}{m \cdot U_{n,f2}} = \frac{630000}{3 \cdot 22000} = 9,545 \text{ A}. \quad (5.4)$$

Z velikosti proudu tekoucího vinutím NN se vyberou rozměry průřezu vývodů, které pro minimalizaci nákladů musí být jednoznačně z hliníku, stejně jako vodiče všech vinutí. Pro volbu rozměrů průřezu vývodů je sestavena tabulka v [26], ve které je seznam různých rozměrů vývodů, a na základě zkušeností byl každému rozměru přiřazen maximální proud. Podle vypočteného proudu $I_{n,f1}$ ve vinutí NN se vybere nejbližší větší vývod z tabulky, v tomto případě pro 909,327 A vychází šířka vývodu $b_{vyv} = 60 \text{ mm}$ a tloušťka $t_{lvyv} = 8 \text{ mm}$. Znat tyto rozměry je nutné pro odpočet plechů v průřezu jádra na straně, kde se budou vývody z vinutí NN vyskytovat, jinak vinutí nepůjde nasadit na jádro.

5.2 Návrh průřezu jádra

Pro návrh průřezu jádra jsou klíčové tři parametry, prvním a druhým jsou průměr D_j a počet stupňů n_{stup} půlkruhové části, tím třetím je délka rovné části L_r , viz rozdělení na obrázku 2.4. Pro sestavení bývají k dispozici plechy od šířky 50 mm do 440 mm v řadě po 10 mm, což znamená, že pokud bude nenulová rovná část, musí být průměr půlkruhových částí přizpůsobený šířce rovné části (musí se jí rovnat), tedy šířka rovné

části a průměr půlkruhových částí nabývají hodnot stejně jako plechy po 10 mm. V případě čistě kruhového tvaru jádra se již nemusí velikost průměru omezovat na dodávané šířky plechů, protože na něj nemusí navazovat rovná část.

Podle optimalizačního programu od firmy Elpro-Energo s.r.o. vychází pro minimalizaci výrobních nákladů nejvýhodněji volby pro průměr půlkruhových částí $D_j = 140$ mm s počtem stupňů $n_{stup} = 7$ a délkou rovné části $L_r = 143$ mm. Je zapotřebí zdůraznit, že počet stupňů zahrnuje odstupňování jen půlkruhových částí, ale celé jádro se jeví, že má stupňů 8, protože rovná část tvoří další stupeň s nejširší šířkou plechu.

Podle počtu stupňů se z tabulek [26] zjistí, které šířky plechů se použijí pro jejich sestavení. Tyto tabulky byly sestaveny pro maximální činitel plnění pro daný průměr a počet stupňů v půlkruhové části, protože každá konfigurace plechů tvoří půlkruhový tvar s jinou plochou v průřezu.

Z tabulky vychází šířky plechů pro sestavení postupně 130, 120, 110, 100, 90, 70, 50 mm. V tomto případě není výběr možností šířek plechů velký, ale u větších průměrů je už optimalizace na maximální plnění důležitá, protože počet variant voleb šířek plechů roste exponenciálně s počtem stupňů a také s velikostí průměru.

Pro každý stupeň je zapotřebí vypočítat jeho maximální tloušťku v jedné sekci (půlkruhová část) při respektování půlkruhového tvaru sekce jádra o průměru D_j . Tloušťka prvního stupně $tl_{pl,1}$ o šířce $b_{pl,1} = 130$ mm se vypočítá podle vztahu

$$tl_{pl,1} = \sqrt{\left(\frac{D_j}{2}\right)^2 - \left(\frac{b_{pl,1}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{140}{2}\right)^2 - \left(\frac{130}{2}\right)^2} = 25,981 \text{ mm}, \quad (5.5)$$

pro druhý stupeň o šířce $b_{pl,2} = 120$ mm platí už pozměněný vztah

$$tl_{pl,2} = \sqrt{\left(\frac{D_j}{2}\right)^2 - \left(\frac{b_{pl,2}}{2}\right)^2} - tl_{pl,1} = \sqrt{\left(\frac{140}{2}\right)^2 - \left(\frac{120}{2}\right)^2} - 25,981 = 10,075 \text{ mm}, \quad (5.6)$$

Kde $tl_{pl,2}$ je tloušťka druhého stupně.

Pro všechny další stupně platí rozšířený zobecněný vztah jako pro druhý stupeň

$$tl_{pl,n} = \sqrt{\left(\frac{D_j}{2}\right)^2 - \left(\frac{b_{pl,n}}{2}\right)^2} - \sum_{i=1}^{n-1} tl_{pl,i}, \quad (5.7)$$

kde $tl_{pl,n}$ a $b_{pl,n}$ představují tloušťku, respektive šířku n-tého stupně. Tloušťky vypočítané pro všechny stupně půlkruhové části podle vzorců (5.5), (5.6) a (5.7) jsou totožné s tloušťkami $tl_{pl,1,VN}$ na opačné straně, než kde se z jádra ubírají plechy kvůli vývodům z NN vinutí a jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.2. Parametry počítané v této kapitole jsou zobrazeny na obrázku 5.1.

Tabulka 5.2 Tloušťky stupňů jádra v půlkruhové části na straně VN

Číslo stupně	n	[-]	1	2	3	4	5	6	7
Šířka	$b_{pl,n}$	[mm]	130	120	110	100	90	70	50
Tloušťka	$tl_{pl,n,VN}$	[mm]	25,981	10,075	7,246	5,689	4,629	7,003	4,762

Na straně s NN vývody se pro odpočet plechů musí nejprve určit maximální tloušťka všech plechů až po vývod podle vzorce

$$\begin{aligned}
 tl_{pl,vyv} &= \sqrt{\left(\frac{D_j}{2} + \delta_{j-w1,m}\right)^2 - \left(\frac{b_{vyv}}{2}\right)^2} - tl_{vyv} - tl_{klin} \\
 &= \sqrt{\left(\frac{140}{2} + 1\right)^2 - \left(\frac{60}{2}\right)^2} - 8 - 2 = 54,351 \text{ mm},
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

kde $\delta_{j-w1,m}$ je mechanická vzdálenost mezi jádrem a vinutím NN a její hodnota závisí na velikosti zkušebních napětí vinutí NN. Pro zadané výdržné zkušební napětí $AC_{NN} = 3$ kV odpovídá vzdálenost $\delta_{j-w1,m} = 1$ mm. Mechanická vzdálenost značí, že se jedná o vzdálenost jen po začátek izolační lepenky na vnitřním průměru vinutí NN, zatímco elektrická $\delta_{j-w1,e}$ je mezi jádrem a začátkem vodiče. Dále $tl_{klin} = 2$ mm je tloušťka izolačního klínu, který se vkládá mezi jádro a vnitřní vývod.

Následně se od posledního stupně, tedy od sedmého, postupně přepočítá jejich tloušťka $tl_{pl,n,NN}$ podle vzorce

$$tl_{pl,n,NN} = tl_{pl,vyv} - \sum_{i=1}^{n-1} tl_{pl,i} \tag{5.9}$$

kteřý se opakuje pro předchozí stupně jádra, dokud není výsledek nezáporný a pokud vychází záporný, celý daný stupeň na straně NN zaniká.

Pro zadaný případ se rovnice uplatní následovně

$$\begin{aligned}
 tl_{pl,7,NN} &= tl_{pl,vyv} - \sum_{i=1}^6 tl_{pl,i} \\
 &= 54,351 - 25,981 - 10,075 - 7,246 - 5,689 - 4,629 - 7,003 \\
 &= -6,272 \text{ mm},
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

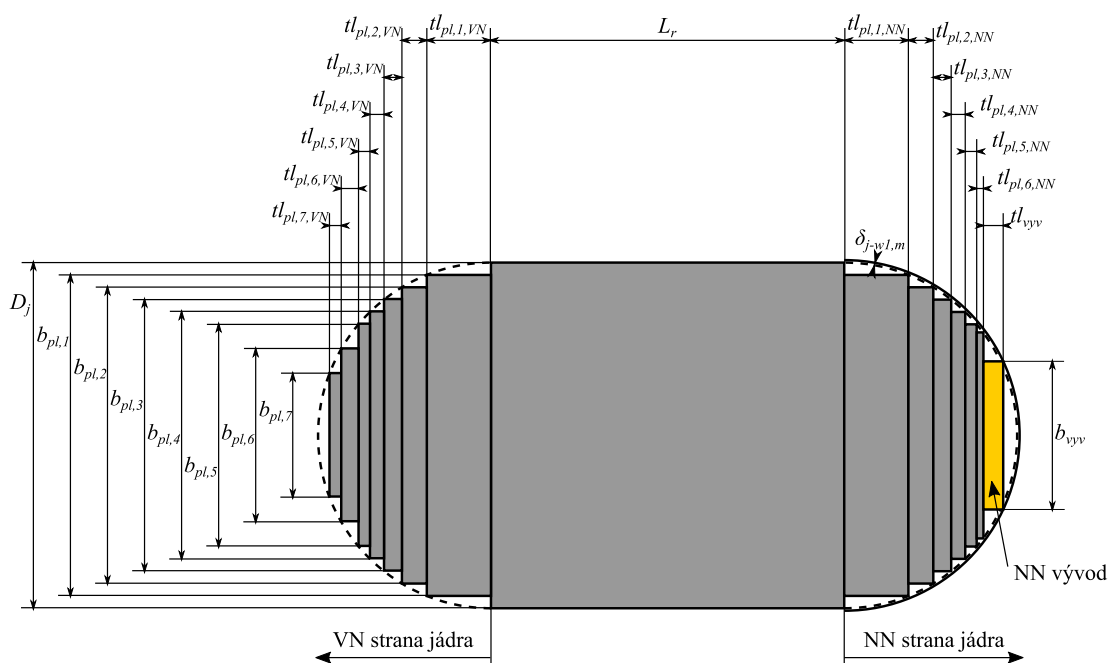
takže stupeň s šířkou plechu 50 mm, se vůbec na straně NN nebude vyskytovat. Pro předchozí šestý stupeň platí vztah

$$\begin{aligned}
 tl_{pl,6,NN} &= tl_{pl,vyv} - \sum_{i=1}^5 tl_{pl,i} \\
 &= 54,351 - 25,981 - 10,075 - 7,246 - 5,689 - 4,629 \\
 &= 0,731 \text{ mm},
 \end{aligned}
 \tag{5.11}$$

šestý stupeň na straně NN má tedy sníženou tloušťku oproti straně VN, předchozí stupně (1. – 5.) jsou totožné. Výsledné tloušťky $tl_{pl,n,NN}$ na straně NN jsou pro přehlednost uvedeny v tabulce 5.3.

Tabulka 5.3 Tloušťky stupňů jádra v půlkruhové části na straně NN

Číslo stupně	n	[-]	1	2	3	4	5	6	7
Šířka	$b_{pl,n}$	[mm]	130	120	110	100	90	70	50
Tloušťka	$tl_{pl,n,NN}$	[mm]	25,981	10,075	7,246	5,689	4,629	0,731	0



Obrázek 5.1 Parametry průřezu jádra.

Obsah, který plechy vyplňují v průřezu se spočítá jako suma ploch jednotlivých stupňů na stranách VN i NN, a rovné části, zapsáno ve vztahu

$$\begin{aligned}
 S_{pl} &= D_j \cdot L_r + \sum_{i=1}^7 b_{pl,i} \cdot (tl_{pl,i,VN} + tl_{pl,i,NN}) \\
 &= 140 \cdot 143 + 130 \cdot (25,981 + 25,981) + 120 \cdot (10,075 + 10,075) \\
 &\quad + \dots + 70 \cdot (7,003 + 0,731) + 50 \cdot (4,762 + 0) \\
 &= 33537,460 \text{ mm}^2.
 \end{aligned}
 \tag{5.12}$$

Pro obsah plochy, kterou lze uvažovat pro přenos magnetického toku, je zapotřebí vynásobit plochu S_{pl} činitelem plnění $k_{pl} = 0,955$, který představuje poměr plochy oceli ku celým plechům včetně povrchové izolace a úžin mezi plechy vzniklé nedokonalým stykem ploch. Plocha oceli S_{Fe} v průřezu se vypočítá vztahem

$$S_{Fe} = S_{pl} \cdot k_{pl} = 33537,460 \cdot 0,955 = 32028,274 \text{ mm}^2. \quad (5.13)$$

Celkový činitel plnění jádra k_{Fe} , později potřebný pro výpočet ztrát naprázdno, se pak vypočítá jako poměr ploch oceli S_{Fe} a oválného tvaru S_j v průřezu jádra, zapsáno jako

$$k_{Fe} = \frac{S_{Fe}}{S_j} = \frac{S_{Fe}}{\pi \cdot \left(\frac{D_j}{2}\right)^2 + D_j \cdot L_r} = \frac{32028,274}{\pi \cdot \left(\frac{140}{2}\right)^2 + 140 \cdot 143} = 0,9044. \quad (5.14)$$

Dále ze zjištěné plochy oceli je možné vypočítat magnetickou indukci B_j v jádře podle známého vztahu pro harmonický průběh napětí $U_{n,fl}$

$$B_j = \frac{U_{n,fl}}{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f_n \cdot N_{z1,n} \cdot S_{Fe}} = \frac{230,940}{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot 50 \cdot 25 \cdot 32028,274 \cdot 10^{-6}} = 1,30 \text{ T}, \quad (5.15)$$

což je bezpečně menší než hraniční hodnota 1,8 T, kterou by návrh jádra neměl překročit. Ve vztahu (5.15) $N_{z1,n}$ značí počet závitů NN vinutí a jedná se o volený parametr, který podle optimalizačního programu vychází na 25 závitů.

Jako poslední u návrhu jádra je kontrola, zda jsou navržené rozměry jádra schůdné s navíjecí rozpínacím trnem pro vinutí. První kontrolovaný rozměr je skutečná tloušťka celého jádra, která se vypočítá jako suma tlouštěk všech plechů $tl_{pl,j}$

$$\begin{aligned} tl_{pl,j} &= L_r + \sum_{i=1}^7 (tl_{pl,i,VN} + tl_{pl,i,NN}) \\ &= 143 + (25,981 + 25,981) + (10,075 + 10,075) + \dots \\ &\quad + (7,003 + 0,731) + (4,762 + 0) = 262,734 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (5.16)$$

Výsledná hodnota $tl_{pl,j}$ je v nastavitelných mezích daného trnu, které jsou minimálně 180 mm a maximálně 300 mm na délku. Dalším limitem trnu je drážka pro vložení vývodu z NN vinutí, který z vinutí vyčnívá do svého vnitřního prostoru. U trnu o průměru 140 mm v kruhové části má drážka rozměry 60 mm na šířku a 8 mm do hloubky, což jsou přesné rozměry přiřazeného vývodu ($b_{v,vv} = 60 \text{ mm}$, $tl_{v,vv} = 8 \text{ mm}$), takže počítaný výkon 630 kVA je pro odpovídající trn nejvyšší použitelný.

5.3 Vinutí NN

Díky optimalizačnímu programu bylo zjištěno, že nevhodnější rozměry fólie pro vinutí NN je výška $h_{vl} = 750$ mm a šířka $b_{vl} = 1,10$ mm, kde dodavatel fólie nabízí jakékoliv výšky s krokem po 10 mm a šířky po 0,05 mm s nejvyšší možnou výškou 800 mm a šířkou 2,5 mm pro hliník. Pro zvolenou fólii je pak průřez S_{w1} s jedním paralelním vodičem

$$S_{w1} = h_{v1} \cdot b_{v1} = 750 \cdot 1,10 = 825 \text{ mm}^2. \quad (5.17)$$

Na základě optimalizačního programu nejsou ve vinutí NN nutné chladicí kanály, velký podíl na tom má požadavek na Eco design, kde díky omezeným ztrátám nakrátko není potřeba odvádět tolik tepla z vinutí. Bez chladicích kanálů není potřeba vinutí rozdělovat do sekcí, které jsou zmíněné v kapitole 0 a výpočet rozměrů je jednodušší.

Pro výpočet elektrického radiálního rozměru neboli šířky vinutí NN je nutné znát tloušťku mezizávitové izolace. Ta má pro zadaná napětí hodnotu $b_{i1} = 0,15$ mm, kterou tvoří 0,125 mm tlustý izolační papír a 0,025 mm vrstva pryskyřice na vytvrzení na povrchu papíru. Šířka vinutí NN je pak podle [26]

$$\begin{aligned} B_{w1,e} &= N_{z,n1} \cdot b_{v1} + (N_{z1,n} - 1) \cdot b_{i1} = 25 \cdot 1,10 + (25 - 1) \cdot 0,15 \\ &= 31,1 \text{ mm}, \end{aligned} \quad (5.18)$$

kde $N_{z1,n}$ je počet závitů vodiče NN a $(N_{z1,n} - 1)$ je počet závitů mezipolohové izolace. Pro výpočet mechanické šířky vinutí NN se musí k elektrické šířce připočítat izolační lepenka na vnitřním průměru $b_{i1,i} = 1$ mm a také jeden závit mezipolohové izolace b_{i1} , protože se navíjí rovnou s vodivou fólií a ta je i na vnitřním průměru. Připočítat se musí také izolace na vnějším průměru vinutí NN $b_{i1,e}$ před hlavním kanálem, která vzniká několika oviny stejným papírem jako je mezipolohová izolace. Stejná tloušťka izolačního papíru je i na druhé straně hlavního kanálu, tedy na vnitřním průměru vinutí VN $b_{i2,i}$, aby byl elektrický gradient rovnoměrně rozložený mezi vinutími. Počet ovinů pak závisí na zkušebních napětích vinutí VN, a pro zadané hodnoty je potřeba 10 ovinů před i za hlavním kanálem, tloušťky izolací $b_{i1,e}$ a $b_{i2,i}$ jsou

$$b_{i1,e} = b_{i2,i} = 10 \cdot b_{i1} = 10 \cdot 0,15 = 1,5 \text{ mm}. \quad (5.19)$$

Mechanická šířka vinutí NN je pak

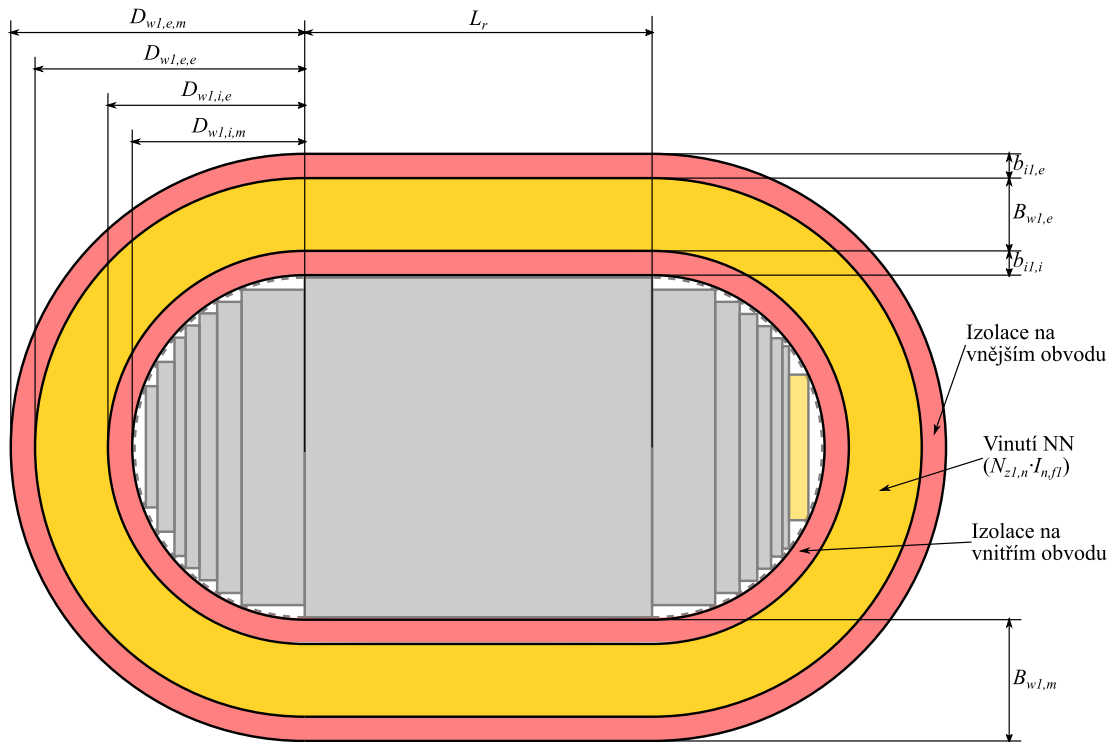
$$\begin{aligned} B_{w1,m} &= b_{i1,i} + b_{i1} + B_{w1,e} + b_{i1,e} = 1 + 0,15 + 31,1 + 1,5 \\ &= 33,75 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (5.20)$$

Dalším rozměrem pro výpočet je axiální výška vinutí NN, elektrická $H_{w1,e}$ i mechanická $H_{w1,m}$. Jelikož je fóliové vinutí jednodeskové, čili v axiálním směru je jediný vodič po celé délce je elektrická výška $h_{w1,e}$ rovna výšce fólie h_{vl} a pro mechanickou výšku stačí připočítat šířku role (v podélném řezu vinutí se jeví jako výška) okrajové izolační pásky h_{i1} na obou okrajích vinutí NN. Tento rozměr pásky je určen tabulkou v

[26] podle zkušebních napětí obou vinutí, protože velikost pásky souvisí i s šířkou okrajové izolace u vinutí VN, aby rozdíl mezi elektrickými výškami obou vinutí nebyl příliš velký. I když je kvůli elektrické pevnosti vhodné, aby NN vinutí mělo v axiálním směru přesah oproti vinutí VN, ale s rostoucím přesahem se zvyšuje příčná složka rozptylového toku, který má za následek větší rozptylovou indukčnost a také větší přídavné ztráty ve vodičích.

Zadaným zkušebním napětím odpovídá šířka okrajové pásky na vinutí NN $h_{i1} = 8,5$ mm a mechanická výška vinutí je

$$H_{w1,m} = H_{w1,e} + 2 \cdot h_{i1} = 750 + 2 \cdot 8,5 = 768 \text{ mm.} \quad (5.21)$$



Obrázek 5.2 Značení parametrů v řezu vinutím NN. Rozměry na obrázku (především tloušťky izolací) jsou pro přehlednost zvětšené a neodpovídají skutečnému modelu.

Ze znalosti šířek vinutí $B_{w1,m}$ a $B_{w1,e}$, průměrem jádra D_j a mechanické vzdálenosti mezi zmíněnými částmi $\delta_{j-w1,m}$ lze určit průměry vinutí NN potřebné pro další výpočty. Směrem od středu jádra ven je první vnitřní mechanický průměr $D_{w1,i,m}$

$$D_{w1,i,m} = D_j + 2 \cdot \delta_{j-w1,m} = 140 + 2 \cdot 1 = 142 \text{ mm,} \quad (5.22)$$

dále následuje za izolacemi $b_{i1,i}$ na vnitřním průměru vinutí NN a jednom ovinu mezipolohové izolace b_{i1} elektrický vnitřní průměr $D_{w1,i,e}$

$$\begin{aligned} D_{w1,i,e} &= D_{w1,i,m} + 2 \cdot b_{i1,i} + 2 \cdot b_{i1} = 142 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 0,15 \\ &= 144,3 \text{ mm.} \end{aligned} \quad (5.23)$$

Vnitřní průměr vinutí NN je totožný vždy pro všechny sekce A, C, D (v kap. 0) neohledně na volbu chladicích kanálů. Jelikož v tomto návrhu žádné nejsou, platí to i pro elektrický $D_{w1,e,e}$ a mechanický $D_{w1,e,m}$ vnější průměr podle vztahů

$$D_{w1,e,e} = D_{w1,i,e} + 2 \cdot B_{w1,e} = 144,3 + 2 \cdot 31,1 = 206,5 \text{ mm}, \quad (5.24)$$

$$D_{w1,e,m} = D_{w1,i,e} + 2 \cdot B_{w1,m} = 144,3 + 2 \cdot 33,75 = 209,5 \text{ mm}, \quad (5.25)$$

kde $B_{w1,e}$ je elektrická šířka vinutí NN a $b_{i1,e}$ izolace na vnějším průměru před hlavním kanálem. Celková délka fólie L_{w1} ve vinutí NN se vypočítá součinem počtu závitů $N_{z1,n}$ a středního obvodu vinutí, viz vztah

$$\begin{aligned} L_{w1} &= N_{z1,n} \cdot \left(\frac{D_{w1,i,e} + D_{w1,e,e}}{2} \cdot \pi + 2 \cdot L_r \right) \\ &= 25 \cdot \left(\frac{144,3 + 206,5}{2} \cdot 10^{-3} \cdot \pi + 2 \cdot 143 \cdot 10^{-3} \right) = 20,926 \text{ m}. \end{aligned} \quad (5.26)$$

Z délky se určí celková hmotnost vodiče G_{w1} všech tří fází podle vztahu

$$\begin{aligned} G_{w1} &= m \cdot L_{w1} \cdot S_{w1} \cdot \rho_{m,Al} = 3 \cdot 20,926 \cdot 825 \cdot 10^{-6} \cdot 2700 \\ &= 139,838 \text{ kg}, \end{aligned} \quad (5.27)$$

kde m je počet fází, S_{w1} průřez vinutí a $\rho_{m,Al}$ je hustota materiálu vodiče – hliníku s hodnotou 2700 kg/m. Odpor vodiče $R_{w1,20}$ ve vinutí NN s měrnou elektrickou vodivostí $\sigma_{Al} = 35 \text{ S} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}$ při teplotě 20 °C je

$$R_{w1,20} = \frac{1}{\sigma_{Al}} \cdot \frac{L_{w1}}{S_{w1}} = \frac{1}{35} \cdot \frac{20,926}{825} = 724,710 \text{ } \mu\Omega. \quad (5.28)$$

Ohmické ztráty $P_{ohm1,20}$ ve všech m fázích při teplotě 20 °C jsou součinem odporu vodiče $R_{w1,20}$ a kvadrátu jmenovitého proudu ve vinutí NN ve vztahu

$$\begin{aligned} P_{ohm1,20} &= m \cdot R_{w1,20} \cdot I_{n,f1}^2 = 3 \cdot 724,710 \cdot 10^{-6} \cdot 909,327^2 \\ &= 1797,735 \text{ W}. \end{aligned} \quad (5.29)$$

Jenže ztráty nakrátko jsou definovány jako ztráty při jmenovitém zatížení, kdy je vodič zahřátý na referenční teplotu, u olejového transformátoru se jedná o teplotní třídu F, kde je referenční teplota 75 °C podle normy [27]. U ohmických ztrát $P_{ohm1,20}$ je tedy nutné referenční teplotu zohlednit a přepočítat je podle teplotního koeficientu vodivosti hliníku $k_{\theta,Al} = 225 \text{ } ^\circ\text{C}$ v následujícím vztahu

$$\begin{aligned} P_{ohm1,75} &= P_{ohm1,20} \cdot \frac{k_{\theta,Al} + 75}{k_{\theta,Al} + 20} = 1797,735 \cdot \frac{225 + 75}{225 + 20} \\ &= 2201,308 \text{ W}. \end{aligned} \quad (5.30)$$

Určení přídatných ztrát vlivem jevu blízkosti je věnovaná kapitola 5.5, kde je zapotřebí znát i parametry vinutí VN.

5.4 Vinutí VN

Jako u vnitřního vinutí NN, tak i u vnějšího VN vinutí jsou parametry vodiče zvoleny podle optimalizačního programu. Zde jsou také dva volené parametry definující vodič, a to průměr holého vodiče (bez skelné izolace) d_{v2} a jeho zploštění z_{v2} , které vzniká průchodem vodiče přes zplošťovací válečky. Vodiče lze vybírat z vyráběné řady s dostupnými průměry od 0,48 mm do 5,00 mm pro hliník a 0,53 mm do 3,80 mm pro měď. Zploštění je možné volit do 45 % pro hliník a do 30 % pro měď, s tím, že minimální hodnota je 10 % neohledě na materiál vodiče. Aby mohl být vodič zploštěný, musí být izolace na povrchu vodiče třídy GR2 a obecně se dá říct, že její tloušťka roste s průměrem vodiče. Pro každý průměr je navíc definovaný zplošťovací koeficient k_{zv} , který zohledňuje změnu rozměrů po jeho zploštění.

Na základě optimalizačního programu je zvolen průměr vodiče VN $d_{v2} = 3,30$ mm a zploštění $z_{v2} = 40$ % a vodič je stejně jako vinutí NN z hliníku a ve vinutí není třeba chladicího kanálu. Z uvedených hodnot je možné dopočítat výšku a šířku průřezu vodiče po zploštění, ale nejprve se musí vypočítat průměr vodiče s izolací $d_{v2,i}$. Jestliže tloušťka izolace pro zvolený vodič je $i_{v2} = 0,085$ mm celkově na obou stranách, pak průměr vodiče s izolací je

$$d_{v2,i} = d_{v2} + i_{v2} = 3,30 + 0,085 = 3,385 \text{ mm.} \quad (5.31)$$

Koeficient zploštění nutný pro přepočítání rozměrů je $k_{zv} = 1,15064$ a je využit ve vztahu pro výpočet šířky vodiče s izolací $b_{v2,i}$

$$b_{v2,i} = d_{v2,i} \cdot \left(1 - \frac{z_{v2}}{100} \right) = 3,385 \cdot \left(1 - \frac{40}{100} \right) = 2,208 \text{ mm.} \quad (5.32)$$

Při uvažování zachování průřezu S_{w2} vodiče jako měl před svým zploštěním, výšku vodiče s izolací $h_{v2,i}$ dostaneme ze vztahu

$$\begin{aligned} h_{v2,i} &= d_{v2,i} + \frac{\left(d_{v2,i}^2 \cdot \arccos\left(\frac{b_{v2,i}}{d_{v2,i}}\right) - b_{v2,i} \cdot \sqrt{d_{v2,i}^2 - b_{v2,i}^2} \right)}{2 \cdot b_{v2,i}} \\ &= 3,385 + \frac{3,385^2 \cdot \arccos\left(\frac{2,208}{3,385}\right) - 2,208 \cdot \sqrt{3,385^2 - 2,208^2}}{2 \cdot 2,208} \\ &= 4,334 \text{ mm,} \end{aligned} \quad (5.33)$$

kde je dobré zdůraznit, že se do arkusu kosinu dosazuje v radiánech.

Pro přídavné ztráty budou zapotřebí hodnoty šířky b_{v2} a výšky h_{v2} holého vodiče, které se zjistí odečtením oboustranné izolace i_{v2} od šířky $b_{v2,i}$ a výšky $h_{v2,i}$ vodiče s izolací

$$b_{v2} = b_{v2,i} - i_{v2} = 2,208 - 0,085 = 2,123 \text{ mm,} \quad (5.34)$$

$$h_{v2} = h_{v2,i} - i_{v2} = 4,334 - 0,085 = 4,249 \text{ mm.} \quad (5.35)$$

Průřez vinutí VN S_{w2} se počítá z původního průměru d_{v2} kruhového tvaru vodiče

$$S_{w2} = \pi \cdot \left(\frac{d_{v2}}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{3,30}{2}\right)^2 = 8,553 \text{ mm}^2. \quad (5.36)$$

Další částí výpočtu, podobně jako u vinutí NN, jsou axiální rozměry vinutí. Mechanická výška $H_{w2,m}$ vinutí VN je stejná jako u vinutí NN $H_{w1,m}$ tedy

$$H_{w2,m} = H_{w1,m} = 767 \text{ mm.} \quad (5.37)$$

Ovšem okrajová izolace má u VN větší výšku v řezu (šířku izolační pásky) $h_{i2} = 16 \text{ mm}$ jednostranně a elektrická výška vinutí VN je nižší

$$H_{w2,e} = H_{w2,m} - 2 \cdot h_{i2} = 767 - 2 \cdot 16 = 735 \text{ mm.} \quad (5.38)$$

Na rozdíl od vinutí NN se počet závitů $N_{z2,n}$ na VN straně nevolí, ale je dán požadovaným převodem. Počet závitů na jmenovité odbočce je přímo úměrný počtu závitů $N_{z1,n}$ na NN straně a poměru vyššího napětí $U_{n,f2}$ ku nižšímu $U_{n,f1}$

$$N_{z2,n} = N_{z1,n} \cdot \frac{U_{n,f2}}{U_{n,f1}} = 25 \cdot \frac{22000}{230,940} \doteq 2382, \quad (5.39)$$

celkový počet závitů $N_{z2,c}$ na VN vinutí je ovšem díky plusovým odbočkám r_{odb} o $2 \cdot 2,5 \% = 5 \%$ větší

$$N_{z2,c} = N_{z2,n} \cdot \frac{100 + r_{odb}}{100} = 2382 \cdot \frac{100 + 5}{100} \doteq 2501. \quad (5.40)$$

Tento celkový počet závitů se musí rozdělit do jednotlivých poloh s tím, že každá poloha může být vysoká maximálně do elektrické výšky vinutí VN $H_{w2,e}$ snížené o malý posun polohy od okraje, která vzniká z důvodu bezpečnosti navíjení při přechodu z jedné polohy do druhé, aby první závity nové polohy nepřepadly do předchozí. Tato vzdálenost je zvolena přibližně jako průměr vodiče $h_{zmen} = 3 \text{ mm}$, a s každou polohou se střídá místo u okrajů vinutí, ve kterém se posun závitů nachází. Maximální výška polohy h_{pol} pak je

$$h_{pol} = H_{w2,e} - h_{zmen} = 735 - 3 = 732 \text{ mm.} \quad (5.41)$$

Maximální počet závitů, které se vejdou do polohy, je podílem maximální výšky polohy h_{pol} a výšky izolovaného zploštěného vodiče $h_{v2,i}$ vynásobeného koeficientem $k_{v2} = 1,003$ zohledňující nepřesnost při navíjení, kdy nejsou závity nejsou ukládány perfektně natěsně vedle sebe. Maximální počet závitů v poloze $N_{z2,pol,max}$ je tedy

$$N_{z2,pol,max} = \frac{h_{pol}}{h_{v2,i} \cdot k_{v2}} = \frac{732}{4,334 \cdot 1,003} = 168,39 \doteq 168, \quad (5.42)$$

kde se výsledek musí zaokrouhlit dolů na celé číslo, protože více závitů, než je vypočítaná hodnota, se do polohy nevejde.

Podílem celkového počtu závitů $N_{z2,c}$ maximálním počtem v poloze $N_{z2,pol,max}$ dostaneme počet poloh n_{pol} , do kterých se závity rozdělí

$$n_{pol} = \frac{N_{z2,c}}{N_{z2,pol,max}} = \frac{2501}{168} = 14,89 \doteq 15, \quad (5.43)$$

výsledek se tentokrát musí zaokrouhlit nahoru.

Jelikož počet závitů většinou není dělitelný počtem poloh, je možné postupně polohy plnit maximálním počtem závitů $N_{z2,pol,max} = 168$, které se vejdou, a do poslední polohy navinout zbylý počet závitů, v takovém případě by to bylo 149 závitů v 15. poloze podle vztahu (5.45), což není velký nepoměr vůči předchozím polohám, avšak tento výsledek je dán hlavně díky optimalizované volbě parametrů. Při horším návrhu by se mohlo stát, že do poslední polohy vyjde třeba pouze jeden závit, což je značně neefektivní z hlediska využití rozměrů vinutí a zbytečně tak narůstá šířka vinutí. Dalším problémem je nesymetričnost vinutí, proto je v takovém případě vhodné aspoň přerozdělit závity mezi polohami $N_{z2,pol}$ podle vztahu

$$N_{z2,pol} = \frac{N_{z2,c}}{n_{pol}} = \frac{2501}{15} = 166,73 \doteq 167, \quad (5.44)$$

kde se výsledek zaokrouhluje nahoru, aby v poslední poloze nevyšlo více než je maximální počet závitů. Tímto řešením bude počet závitů roven nebo menší než v ostatních polohách, ale s minimálním rozdílem. Po přerozdělení závitů v řešeném případě zbude v poslední poloze $N_{z2,pol,15}$ závitů (rozdíl celkového počtu závitů $N_{z2,c}$ ve VN vinutí a počtu závitů v předchozích $n_{pol} - 1$ polohách)

$$\begin{aligned} N_{z2,pol,15} &= N_{z2,c} - (n_{pol} - 1) \cdot N_{z2,pol} = 2501 - (15 - 1) \cdot 167 \\ &= 163. \end{aligned} \quad (5.45)$$

Po tom, co jsou závity v jednotlivých polohách vyřešené, bude se probírat vyvedení odboček. Počet závitů, které tvoří plusové odbočky, je rozdílem celkového počtu závitů $N_{z2,c}$ vinutí VN a jmenovitého počtu závitů $N_{z2,n}$. Na opačnou stranu stejný počet závitů tvoří obě minusové odbočky. Nazveme-li část vinutí, ze které se vytahují odbočky, odbočkovou sekcí, pak jí tvoří $N_{z2,odb}$ závitů

$$N_{z2,odb} = 2 \cdot (N_{z2,c} - N_{z2,n}) = 2 \cdot (2501 - 2382) = 238, \quad (5.46)$$

a doplňkem odbočkové sekce ve vinutí VN je neodbočková sekce se $N_{z2,neodb}$ závity

$$N_{z2,neodb} = N_{z2,c} - N_{z2,odb} = 2501 - 238 = 2263. \quad (5.47)$$

Vyvedení odbočky se provede z $N_{z2,odb,i}$ -tého závitů v odbočkové části a celkově při zapojení této odbočky bude aktivních $N_{z2,i}$ závitů, kde $i = -5; -2,5; 0; +2,5; +5$ a označuje zapojenou odbočku jako parametr ve vztahu (5.49). Pro vyhnutí se chybě vzniklé zaokrouhlením jmenovitého počtu závitů na VN straně na celé číslo, je lepší počítat s požadovaným napěťovým převodem $K_{U,teor,i}$ na i -té odbočce, který se určí ze vztahu

$$K_{U,teor,i} = \frac{U_{z2,n}}{U_{z1,n}} \cdot \frac{(100 + i)}{100}. \quad (5.48)$$

Celkový počet závitů $N_{z2,i}$, které budou při zapojení i -té odbočky aktivní, je součin požadovaného převodu $K_{U,teor,i}$ a počtu závitů $N_{z1,n}$ na NN straně, výsledek se pak zaokrouhlí na celé číslo ve vztahu

$$N_{z2,i} = K_{U,teor,i} \cdot N_{z1,n}. \quad (5.49)$$

Číslo závitů $N_{z2,odb,i}$ v odbočkové části, ze kterého se vyvádí požadovaná odbočka je pak rozdíl počtu aktivních závitů při zapojení $N_{z2,i}$ a celkový počet závitů $N_{z2,neodb}$ v neodbočkové části

$$N_{z2,odb,i} = N_{z2,i} - N_{z2,neodb}. \quad (5.50)$$

Následně je zapotřebí zkontrolovat napěťový převod na všech odbočkách, protože vlivem zaokrouhlení počtu závitů na celé číslo vzniká chyba $k_{U,chyb,i}$. Maximální dovolená chyba převodu je podle normy [25] $\pm 0,5$ %. Pokud by u některé odbočky převod vyšel s chybou větší, je nutné změnit počet závitů $N_{z1,n}$ na NN straně. Napěťový převod pro aktuální návrh $K_{U,i}$ se vypočítá podle vztahu

$$K_{U,i} = \frac{N_{z2,i}}{N_{z1,n}}, \quad (5.51)$$

A výsledná chyba $k_{U,chyb,i}$ (v procentech) je pak poměr rozdílu $K_{U,i}$ skutečného a požadovaného $K_{U,teor,i}$ převodu vůči požadovanému převodu.

$$k_{U,chyb,i} = \frac{K_{U,i} - K_{U,teor,i}}{K_{U,teor,i}} \cdot 100. \quad (5.52)$$

Příklad výpočtu rovnic (5.48), (5.49), (5.50), (5.51) a (5.52) je proveden pro odbočku s převodem $-2,5$ % oproti jmenovitému

$$K_{U,teor,-2,5} = \frac{U_{z2,n}}{U_{z1,n}} \cdot \frac{(100 + i)}{100} = \frac{22000}{230,940} \cdot \frac{(100 - 2,5)}{100} = 92,881; \quad (5.53)$$

$$N_{z2,-2,5} = K_{U,teor,-2,5} \cdot N_{z1,n} = 92,881 \cdot 25 = 2322,03 \doteq 2322; \quad (5.54)$$

$$N_{z2,odb,-2,5} = N_{z2,-2,5} - N_{z2,neodb} = 2322 - 2263 = 59; \quad (5.55)$$

$$K_{U,-2,5} = \frac{N_{z2,-2,5}}{N_{z1,n}} = \frac{2322}{25} = 92,880; \quad (5.56)$$

$$k_{U,chyb,-2,5} = \frac{K_{U,-2,5} - K_{U,teor,-2,5}}{K_{U,teor,-2,5}} \cdot 100 = \frac{92,880 - 92,881}{92,881} \cdot 100 = -0,001 \% \quad (5.57)$$

V tabulce 5.4 jsou k nalezení vypočítané hodnoty z těchto vztahů pro všechny odbočky.

Tabulka 5.4 Počet závitů VN vinutí pro vyvedení odboček a kontrola jejich napětového převodu

Odbočka	Závity odbočky celkově	Závity v odb. sekci	Skutečný převod	Požadovaný převod	Chyba
i	$N_{z2,i}$	$N_{z,odb,i}$	$k_{U,i}$	$k_{U,teor,i}$	$k_{U,chyb,i}$
[-]	[-]	[-]	[%]	[%]	[%]
-5	2263 = $N_{z2,neod}$	0	90,52	90,500	0,022
-2,5	2322	59	92,88	92,881	-0,001
0	2382 = $N_{z2,n}$	119	95,28	95,263	0,018
+2,5	2441	178	97,64	97,644	-0,025
+5	2501 = $N_{z2,c}$	238	100,04	100,026	0,014

Z výrobního hlediska je vhodné odbočkovou část zařadit přibližně do poloviny vinutí VN, pokud se do těchto míst přidává chladicí kanál, je lepší vyvést odbočky až za kanálem, který se zde řešit nemusí. Pro tento návrh to bude

$$n_{pol,odb} = \frac{n_{pol}}{2} = \frac{15}{2} = 7,5 \doteq 8, \quad (5.58)$$

8. poloha, kde se začnou vyvádět odbočky.

Vzhledem k tomu, že v odbočkové části je 238 závitů, bude se muset rozdělit do dvou poloh ($2 \cdot 167$), které mají dohromady 334 závitů. Navíc odbočka se nesmí vyvádět blízko okrajů (méně jak 10 závitů), protože zde není moc prostoru pro fixaci drátu v místě ohybu směrem ven z vinutí. Pokud se provedou první tři vývody v 8. poloze a zbylé dva v poloze 9., pak je vhodné, aby třetí a páté vyvedení bylo stejně vzdálené od svého nejbližšího okraje, tj.

$$N_{z2,okr,0} = \frac{N_{z2,odb,+2,5} - N_{z2,odb,0}}{2} = \frac{178 - 119}{2} = 29,5 \doteq 29, \quad (5.59)$$

kde je lepší, když se zaokrouhlí výsledek dolů.

Od začátku navíjení se tak první vývod, tedy začátek odbočkové sekce $N_{z2,odb,zac}$, uskuteční v 8. poloze, celkově ze 1188. závitu podle vztahu

$$\begin{aligned} N_{z2,odb,zac} &= N_{z2,pol} \cdot n_{pol,odb} - N_{z2,okr,0} - N_{z2,pol,0} \\ &= 167 \cdot 8 - 29 - 119 = 1188. \end{aligned} \quad (5.60)$$

Další vyvedení se provede $N_{z2,odb,1} = 59$ závitů od začátku odbočkové sekce $N_{z2,odb,zac}$, tedy celkově od začátku navíjení ze 1247. závitu a třetí vyvedení stejným postupem ze 1307. závitu, obojí ještě v 8. poloze. V následující 9. poloze se provedou ještě další dvě vyvedení z celkového 1366. a , respektive 1426. závitu, dále se už plynule pokračuje s navíjením až do 15. polohy, kde se skončí závitem s číslem 2501. Drát třetí odbočky se ještě přestřihává, aby vznikly dva oddělené konce pro připojení na přepínač odboček.

Návrh vinutí VN pokračuje dimenzováním progresivní mezipolohové izolace, kde je potřeba zvláště zohlednit namáhání střídavým napětím o frekvenci 50 Hz při zkoušce indukovaným napětím a namáhání rázovou vlnou při zkoušce impulsním výdržným napětím.

Zkouška indukovaným napětím $U_{i,VN}$ se běžně provádí s dvojnásobným jmenovitým napětím $U_{n,VN}$, ale pro bezpečnou rezervu bude počítáno s dvojnásobkem nejvyššího provozního napětí $U_{m,VN}$, indukované napětí bude pod značením $U_{i,VN} = 50$ kV. Jelikož se jedná o dlouhodobou zkoušku v ustáleném stavu, napětí je mezi závity rozloženo lineárně, a proto je namáhání až na poslední polohu, kde je o 4 závity méně, stejné pro všechny mezipolohy. Napětí na závit $u_{z,VN}$ při zapojení jmenovité odbočky vychází

$$u_{z,VN} = \frac{U_{i,VN}}{N_{z2,n}} = \frac{50000}{2382} = 20,991 \text{ V}, \quad (5.61)$$

potom je nutná tloušťka izolace $b_{i2,AC,1}$ v elektricky nejvíc namáhaném místě mezi dvěma prvními polohami ($2 \cdot N_{z2,pol}$) podle vztahu

$$b_{i2,AC,1} = \frac{u_{z,VN}}{E_{d,U_n}} \cdot k_{Ui} \cdot 2 \cdot N_{z2,pol} = \frac{20,991}{6,5 \cdot 10^3} \cdot 0,5 \cdot 2 \cdot 167 = 0,539 \text{ mm}, \quad (5.62)$$

kde $E_{d,U_n} = 6,5$ kV/mm je měrná elektrická pevnost izolační pásky pro jmenovité namáhání, které však musí vydržet několik desetiletí. Protože zkouška indukovaným napětím je v rádech minut, je zde zahrnutý i opravný koeficient $k_{Ui} = 0,5$ pro návrhovou izolační hladinu, který tento fakt zohledňuje.

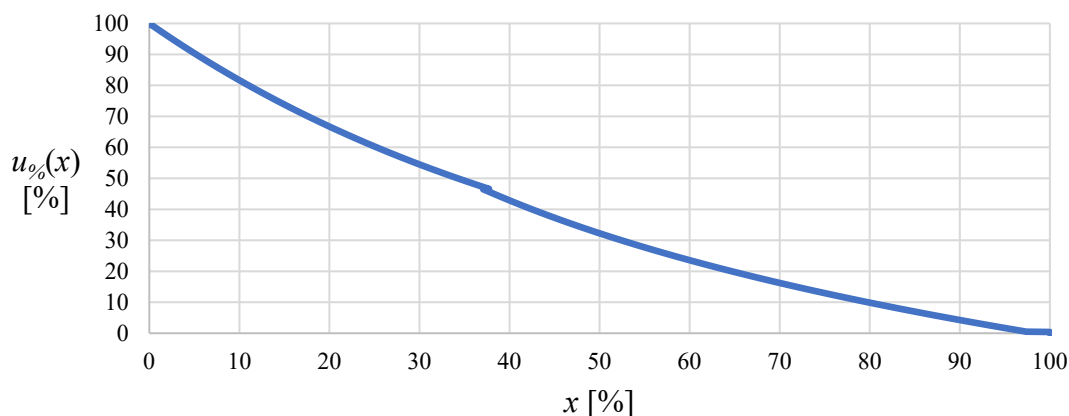
Vypočítaná tloušťka izolace v nejvíce namáhaném bodě z (5.62) platí i pro všechny ostatní mezipolohy, kromě poslední. Tedy $b_{i2,AC,2} = \dots = b_{i2,AC,13} = 0,539$ mm. Tloušťka izolace mezi konci 14. a 15. polohy $b_{i2,AC,14}$ je pak

$$\begin{aligned} b_{i2,AC,14} &= \frac{u_{z,VN}}{E_{d,U_n}} \cdot k_{Ui} \cdot (N_{z2,pol} + N_{z2,pol,15}) \\ &= \frac{20,991}{6,5 \cdot 10^3} \cdot 0,5 \cdot (167 + 163) = 0,533 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (5.63)$$

Při zkoušce výdržným impulsním napětím se díky rychlému přechodnému ději přiložené napětí vybíjí přes síť parazitních mezizávitových kapacit, kapacit k zemi a indukčností. Rozložení napětí ve vinutí je tak nerovnoměrné. Mnohem větší mezizávitové napěťové namáhání vzniká na závitěch v blízkosti vývodu, na který je připojena svorka ze zkušebního generátoru, a směrem dál od něj se namáhání snižuje. Zjednodušeně se dá rozložení napětí uvažovat s tvarem

$$\begin{aligned} x \in \langle 0; 0,5 \rangle \dots u_{\%}(x) &= 100 \% \\ x \in \langle 0,5; 46,5 \rangle \dots u_{\%}(x) &= 98,423 \cdot e^{-0,021 \cdot x} \\ x \in \langle 46,5; 99,5 \rangle \dots u_{\%}(x) &= -49,4 \cdot \ln(x) + 227,5 \\ x \in \langle 99,5; 100 \rangle \dots u_{\%}(x) &= 0 \%, \end{aligned} \quad (5.64)$$

kde x je relativní vzdálenost od začátku vinutí a $u_{\%}(x)$ je poměr napětí v dané vzdálenosti x ku celkovému přiloženému napětí k vinutí VN. Grafické zpracování této závislosti je na obrázku 5.3.



Obrázek 5.3 Rozložení napětí ve vinutí VN při rázové zkoušce

Největší napěťové namáhání první mezipolohy se určí z rozdílu napětí na začátku dané polohy a konce polohy následující (=začátek přespršší polohy). Proto se nejprve musí určit relativní vzdálenosti x těchto bodů a pro konec j -té polohy platí vztah

$$x_{A,j} = \frac{100}{N_{z2,-5}} \cdot \sum_{i=1}^j N_{z2,pol,i} \quad (5.65)$$

kde index A značí výpočet vzdálenosti od začátku vinutí VN na vnitřním průměru. Pro uvažování nejvíce nepříznivého stavu se volí zapojení nejmenší odbočky -5 %.

Po dosazení má konec druhé polohy vzdálenost

$$x_{A,2} = \frac{100}{N_{z2,-5}} \cdot (N_{z2,pol,1} + N_{z2,pol,2}) = \frac{100}{2263} \cdot (167 + 167) = 14,759 \% \quad (5.66)$$

Podobným způsobem jsou dopočítány hodnoty pro všechny polohy v tabulce 5.5.

Po dosazení do rovnice (5.64) dostaneme pro konec druhé polohy poměrné napětí $u_{\%}(x_{A,2}) = 72,192 \%$. A potřebná tloušťka izolace v první mezipoloze $b_{i2,LI,A,1}$ se vypočítá podle vztahu

$$b_{i2,LI,A,1} = \frac{100 - u_{\%}(x_{A,2})}{100} \cdot \frac{LI_{VN}}{E_{d,LI}} = \frac{100 - 72,192}{100} \cdot \frac{150}{65} = 0,642 \text{ mm} \quad (5.67)$$

kde $LI_{VN} = 150 \text{ kV}$ je impulsní výdržné zkušební napětí na straně VN, definované ve vstupních parametrech a $E_{d,LI} = 65 \text{ kV/mm}$ je měrná elektrická pevnost izolační pásky, která již zahrnuje zohlednění krátkodobého působení rázové vlny oproti trvalému namáhání. Pro další mezipolohy $b_{i2,LI,A,j}$ s indexem j již platí upravený vztah

$$b_{i2,LI,A,j} = \frac{u_{\%}(x_{A,j-1}) - u_{\%}(x_{A,j+1})}{100} \cdot \frac{LI_{VN}}{E_{d,LI}}, \quad (5.68)$$

výsledky jsou sepsány v tabulce 5.5.

Tím však dimenzování mezipolohové izolace nekončí, neboť rázový generátor může být připojený i na druhý konec vinutí, takže i z této strany musí být izolace správně zesílená. Úpravou vztahů (5.65), (5.67) a (5.68) se určí nová vzdálenost od druhého konce vinutí $x_{B,j}$ a další tloušťka izolace $b_{i2,LI,B,j}$, kde B značí opačný směr rozložení napětí.

$$x_{B,j} = \frac{100}{N_{z2,-5}} \cdot \left(N_{z2,c} - \sum_{i=1}^j N_{z2,pol,i} \right), \quad (5.69)$$

$$b_{i2,LI,B,1} = \frac{u_{\%}(x_{B,2})}{100} \cdot \frac{LI_{VN}}{E_{d,LI}}, \quad (5.70)$$

$$b_{i2,LI,B,j} = \frac{u_{\%}(x_{B,j+1}) - u_{\%}(x_{B,j-1})}{100} \cdot \frac{LI_{VN}}{E_{d,LI}}. \quad (5.71)$$

Na závěr se v každé poloze j vybere největší výsledek z tlouštěk pro střídavé namáhání izolace $b_{i2,AC,j}$ a pro namáhání impulsním napětím z obou směrů $b_{i2,LI,A,j}$ i $b_{i2,LI,B,j}$. Z výsledků vyplývá, že impulsní napětí vyžaduje zesílení oproti indukovanému jen v prvních a posledních dvou mezipolohách.

Tabulka 5.5 Výpočet tloušťky progresivní mezipolohové izolace

Poloha / Mezipoloha	Vzdálenost ze začátku vnitřní	Vzdálenost od konce vnitřní	Napětí na konci polohy ve směru A	Napětí na konci polohy ve směru B	Tloušťka izolace pro střídavé namáhání	Tloušťka izolace pro rázové namáhání A	Tloušťka izolace pro rázové namáhání B	Výsledná tloušťka izolace
j	$x_{A,j}$	$x_{B,j}$	$u\%(x_{A,j})$	$u\%(x_{B,j})$	$b_{i2,AC,j}$	$b_{i2,LI,A,j}$	$b_{i2,LI,B,j}$	$b_{i2,max,j}$
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	7,380	103,137	84,293	0,000	0,695	0,054	0,539	0,695
2	14,759	95,758	72,192	2,146	0,562	0,153	0,539	0,562
3	22,139	88,378	61,828	6,108	0,481	0,207	0,539	0,539
4	29,518	80,999	52,952	10,415	0,412	0,226	0,539	0,539
5	36,898	73,619	45,350	15,134	0,353	0,248	0,539	0,539
6	44,278	66,240	38,840	20,352	0,318	0,276	0,539	0,539
7	51,657	58,860	32,635	26,187	0,320	0,311	0,539	0,539
8	59,037	51,480	26,039	32,805	0,310	0,320	0,539	0,539
9	66,416	44,101	20,220	38,984	0,276	0,318	0,539	0,539
10	73,796	36,721	15,016	45,519	0,248	0,354	0,539	0,539
11	81,175	29,342	10,307	53,149	0,225	0,413	0,539	0,539
12	88,555	21,962	6,009	62,058	0,206	0,483	0,539	0,539
13	95,935	14,582	2,055	72,461	0,150	0,564	0,539	0,564
14	103,314	7,203	0,000	84,607	0,051	0,688	0,533	0,688
15	110,517	0,000	0,000	100,000	-	-	-	-

Na základě výsledků z tabulky 5.5 je možné určit tloušťku izolační pásky, která bude použita při navíjení. Šířka pásky h_{i2} je již definována jako výška okrajové izolace $h_{i2} = 16$ mm a touto páskou se vine zároveň i mezipolohová izolace. Pro hladší přechod při tvorbě progresivní izolace je lepší použít dvě pásky o tloušťce izolačního papíru $b_{i2,pas2} = 0,06$ mm a třetí pásku o tloušťce $b_{i2,pas3} = 0,5$ mm, která se používá při navíjení okrajové izolace v mezipolohách se zesílením (první a poslední dvě mezipolohy).

Jelikož pro optimalizaci na minimální náklady je chtěný plně automatický režim navíjení, je nutné, aby byla izolace v mezipolohě vytvořená stejným počtem otáček jako vodič v následující poloze, proto může být výsledná vrstva izolace o něco větší, než je požadováno. Maximální dosažitelná tloušťka vrcholu klínu $b_{i2,pas,max}$ s navrženými páskami je podle [26]

$$\begin{aligned}
b_{i2,pas,max} &= 2 \cdot \left(N_{z2,pol} - \frac{2 \cdot b_{v2,i}}{2 \cdot \left(b_{i2,pas2} + \frac{b_{prys}}{2} \right) + \left(b_{i2,pas3} + \frac{b_{prys}}{2} \right)} \right) \\
&\quad \cdot \frac{2 \cdot b_{i2,pas2} \cdot h_{i2}}{H_{w2,m} - h_{i2}} - 2 \cdot b_{i2,pas2} \\
&= 2 \cdot \left(167 - \frac{2 \cdot 2,208}{2 \cdot \left(0,06 + \frac{0,025}{2} \right) + \left(0,5 + \frac{0,025}{2} \right)} \right) \cdot \frac{2 \cdot 0,06 \cdot 16}{767 - 16} \\
&\quad - 2 \cdot 0,06 = 0,695 \text{ mm},
\end{aligned} \tag{5.72}$$

kde $N_{z,pol}$ je počet závitů vodiče v poloze, $H_{w2,m}$ je mechanická výška vinutí VN a b_{prys} je tloušťka pryskyřice nanesené na papíru, který však není po celé ploše, a při více vrstvách papíru je přesnější uvažovat pouze polovinu jeho tloušťky. Pryskyřici však nelze zahrnout do výpočtu elektrické pevnosti, ale je nutné ji započítat do skutečné mechanické tloušťky. Minimum $b_{i2,pas,min}$, které se dá při automatickém režimu ve vrcholu klínu navinout je stejný vztah jako přechází, ale bez třetí pásky $b_{i2,pas3}$

$$\begin{aligned}
b_{i2,pas,min} &= 2 \cdot \left(N_{z2,pol} - \frac{2 \cdot b_{v2,i}}{2 \cdot \left(b_{i2,pas2} + \frac{b_{prys}}{2} \right)} \right) \cdot \frac{2 \cdot b_{i2,pas2} \cdot h_{i2}}{H_{w2,m} - h_{i2}} \\
&\quad - 2 \cdot b_{i2,pas2} \\
&= 2 \cdot \left(167 - \frac{2 \cdot 2,208}{2 \cdot \left(0,06 + \frac{0,025}{2} \right)} \right) \cdot \frac{2 \cdot 0,06 \cdot 16}{767 - 16} - 2 \cdot 0,06 \\
&= 0,578 \text{ mm}.
\end{aligned} \tag{5.73}$$

Požadované tloušťky při dimenzování, které leží mezi hodnotami $b_{i2,pas,min}$ a $b_{i2,pas,max}$ lze navinout přesně, hodnoty které jsou menší než $b_{i2,pas,min}$ už v automatickém režimu nejdou a budou s tloušťkou právě jako $b_{i2,pas,min}$. Opravené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.6 ve sloupci $b_{i2,max,op,j}$. Pro všechny mezipolohy je pak začátek klínu tvořen jedním ovinem obou pásek $b_{i2,pas2}$ a má tedy výšku $b_{i2,min}$

$$b_{i2,min} = 2 \cdot b_{i2,pas2} = 2 \cdot 0,06 = 0,12 \text{ mm}. \tag{5.74}$$

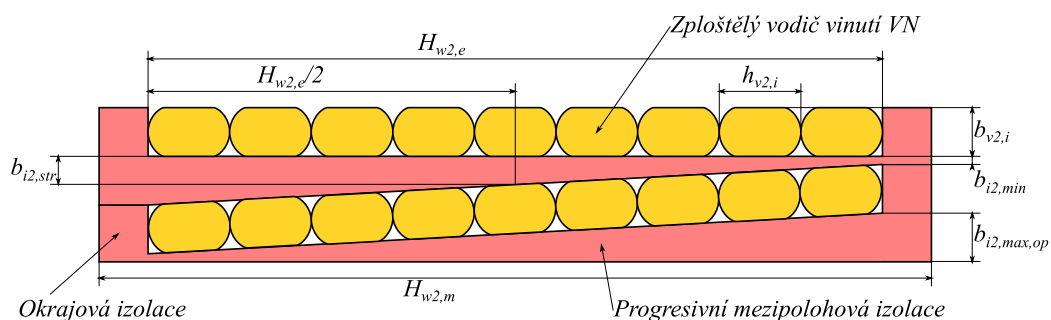
Průměrná tloušťka izolačního papíru j -té mezipolohy je tedy $b_{i2,str,j}$

$$b_{i2,str,j} = \frac{b_{i2,min} + b_{i2,max,op,j}}{2}. \tag{5.75}$$

Parametry jako jsou $b_{i2,min}$ nebo $b_{i2,str,j}$ a další jsou vyznačeny na obrázku 5.4.

Tabulka 5.6 Specifikace mezipolohové izolace ve vnutí VN

Poloha / Mezipolooha	Požadovaná výška klínu na konci progresivní mezipolohové izolace	Vyrobitelná výška klínu na konci progresivní mezipolohové izolace	Výška klínu na začátku progresivní mezipolohové izolace	Průměrná výška progresivní mezipolohové izolace
j	$b_{i2,max,j}$	$b_{i2,max,op,j}$	$b_{i2,min}$	$b_{i2,str,j}$
[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	0,695	0,695	0,12	0,408
2	0,562	0,578	0,12	0,349
3	0,539	0,578	0,12	0,349
4	0,539	0,578	0,12	0,349
5	0,539	0,578	0,12	0,349
6	0,539	0,578	0,12	0,349
7	0,539	0,578	0,12	0,349
8	0,539	0,578	0,12	0,349
9	0,539	0,578	0,12	0,349
10	0,539	0,578	0,12	0,349
11	0,539	0,578	0,12	0,349
12	0,539	0,578	0,12	0,349
13	0,564	0,578	0,12	0,349
14	0,688	0,688	0,12	0,404



Obrázek 5.4 Vyznačení vybraných parametrů ve dvou polohách vnutí VN

Celková tloušťka $b_{i2,papir}$ izolačního papíru ve všech mezipolohách je sumou průměrných výšek v každé poloze

$$b_{i2,papir} = \sum_{i=1}^{14} b_{i2,str,i} = 0,408 + 12 \cdot 0,349 + 0,404 = 5,000 \text{ mm.} \quad (5.76)$$

Jelikož se však jedná pouze o tloušťku izolačního papíru bez nanesené pryskyřice, je nutné její celkovou skutečnou mechanickou tloušťku $b_{i2,skut}$ přepočítat (opět se překrývá více vrstev papíru, proto jen polovina vrstvy pryskyřice na jeden pásek papíru) podle

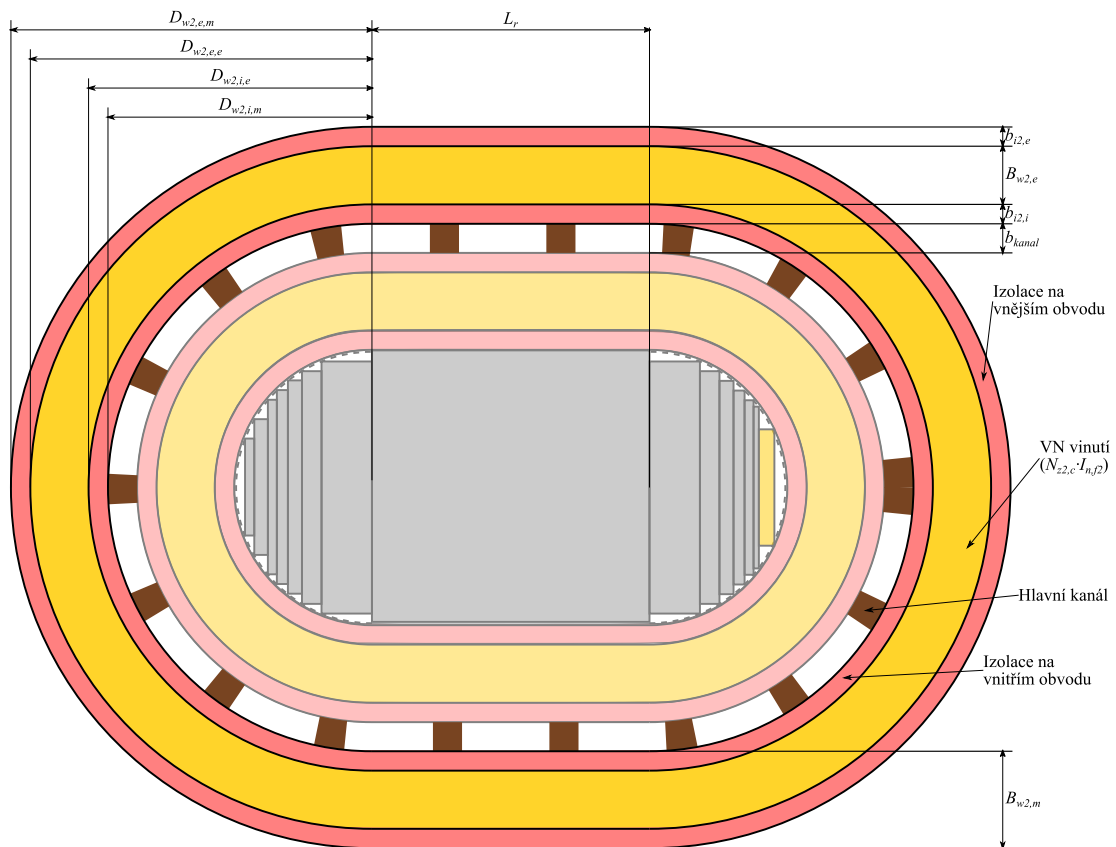
$$b_{i2,skut} = b_{i2,papir} \cdot \frac{b_{i2,pas2} + \frac{b_{prys}}{2}}{b_{i2,pas2}} = 5,000 \cdot \frac{0,06 + \frac{0,025}{2}}{0,06} = 6,042 \text{ mm.} \quad (5.77)$$

Teď už je možné vypočítat elektrický i mechanický radiální rozměr vinutí. Elektrická šířka vinutí $B_{w2,e}$ je součtem skutečné celkové šířky mezipolohové izolace $b_{i2,skut}$ a součinu šířky izolovaného vodiče $b_{v2,i}$ s počtem poloh n_{pol}

$$B_{w2,e} = b_{i2,skut} + b_{v2,i} \cdot n_{pol} = 6,042 + 2,208 \cdot 15 = 39,162 \text{ mm.} \quad (5.78)$$

A stejným způsobem jako u NN vinutí (5.20), přičtením izolace na vnitřním $b_{i2,i}$ a vnějším $b_{i2,e}$ průměru vinutí VN k elektrické šířce $B_{w2,e}$, se získá mechanická šířka vinutí $B_{w2,m}$. Izolace na vnitřním průměru již byla definována v předchozí kapitole $b_{i2,i} = 1,5 \text{ mm}$ a izolace na vnějším průměru má podle zkušebních napětí v tabulkách [26] hodnotu $b_{i2,e} = 0,6 \text{ mm}$. Mechanická šířka $B_{w2,m}$ vinutí VN je pak

$$B_{w2,m} = B_{w2,e} + b_{i2,i} + b_{i2,e} = 39,162 + 1,5 + 0,6 = 41,262 \text{ mm.} \quad (5.79)$$



Obrázek 5.5 Značení parametrů v řezu vinutím VN. Rozměry na obrázku (především tloušťky izolací) jsou pro přehlednost zvětšené a neodpovídají skutečnému modelu.

Stejně jako u vinutí NN se pokračuje výpočtem vnitřních a vnějších mechanických $D_{w2,i,m}$, $D_{w2,e,m}$ i elektrických $D_{w2,i,e}$, $D_{w2,e,e}$ průměrů vinutí, délky vodiče L_{w2} , hmotnosti vodiče G_{w2} , až po určení odporu $R_{w2,20}$ a ohmických ztrát ve vinutí VN při teplotě 20 °C $P_{ohm2,20}$, ale i při referenční teplotě $P_{ohm2,75}$. Vnitřní mechanický průměr $D_{w2,i,m}$ vinutí VN je roven vnějšímu mechanickému průměru $D_{w1,e,m}$ vinutí NN zvětšeného o šířku hlavního kanálu b_{kanal} na obou stranách, jak je patrné z obrázku 5.5. Šířka hlavního kanálu je z tabulek [26] $b_{kanal} = 6$ mm a navrhuje se společně s izolacemi kolem něj podle velikosti zadaných napětí především na VN straně, ale neměl by být menší než 5 mm, aby jím mohl dobře cirkulovat olej. Výpočet vnitřního mechanického průměru $D_{w2,i,m}$ je zde

$$D_{w2,i,m} = D_{w1,e,m} + 2 \cdot b_{kanal} = 209,5 + 2 \cdot 6 = 221,5 \text{ mm.} \quad (5.80)$$

Další výpočty probíhají totožně jako u vinutí NN podle vztahů (5.23) až (5.30), jen s přeindexováním na vinutí VN ($1 \rightarrow 2$)

$$D_{w2,i,e} = D_{w2,i,m} + 2 \cdot b_{i2,i} = 221,5 + 2 \cdot 1,5 = 224,5 \text{ mm,} \quad (5.81)$$

$$D_{w2,e,e} = D_{w2,i,e} + 2 \cdot B_{w2,e} = 224,5 + 2 \cdot 39,162 = 302,824 \text{ mm,} \quad (5.82)$$

$$D_{w2,e,m} = D_{w2,i,e} + 2 \cdot B_{w2,m} = 224,5 + 2 \cdot 41,262 = 304,024 \text{ mm,} \quad (5.83)$$

$$\begin{aligned} L_{w2} &= N_{z2,c} \cdot \left(\frac{D_{w2,i,e} + D_{w2,e,e}}{2} \cdot \pi + 2 \cdot L_r \right) \\ &= 2501 \cdot \left(\frac{224,5 + 302,824}{2} \cdot 10^{-3} \cdot \pi + 2 \cdot 143 \cdot 10^{-3} \right) \\ &= 2786,911 \text{ m,} \end{aligned} \quad (5.84)$$

$$\begin{aligned} G_{w2} &= m \cdot L_{w2} \cdot S_{w2} \cdot \rho_{m,Al} = 3 \cdot 2786,911 \cdot 8,553 \cdot 10^{-6} \cdot 2700 \\ &= 193,075 \text{ kg.} \end{aligned} \quad (5.85)$$

Délka L_{w2} a hmotnost G_{w2} vodiče se u VN vinutí počítá z celkového počtu závitů, ale odpor $R_{w2,20}$ a z něj vycházející ztráty $P_{ohm2,75}$ je nutné přepočítat na jmenovitou odbočku, při jejíž zapojení se ztráty i odpor měří, viz následující vztahy

$$R_{w2,20} = \frac{1}{\sigma_{Al}} \cdot \frac{L_{w2}}{S_{w2}} \cdot \frac{N_{z2,n}}{N_{z2,c}} = \frac{1}{35} \cdot \frac{2786,911}{8,553} \cdot \frac{2382}{2501} = 8,867 \ \Omega, \quad (5.86)$$

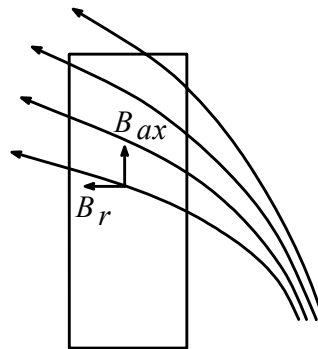
$$P_{ohm2,20} = m \cdot R_{w2,20} \cdot I_{n,f2}^2 = 3 \cdot 8,867 \cdot 9,545^2 = 2423,538 \text{ W.} \quad (5.87)$$

$$\begin{aligned} P_{ohm2,75} &= P_{ohm2,20} \cdot \frac{k_{\theta,Al} + 75}{k_{\theta,Al} + 20} = 2423,538 \cdot \frac{225 + 75}{225 + 20} \\ &= 2967,798 \text{ W.} \end{aligned} \quad (5.88)$$

5.5 Přídavné ztráty ve vinutích

Skutečné ztráty ve vinutích jsou mnohem větší, než jsou vypočítané ohmické ztráty $P_{ohm1,75}$ a $P_{ohm2,75}$ v předešlých dvou kapitolách způsobené stejnosměrnými proudy, které jsou ekvivalentní efektivním hodnotám střídavých proudů $I_{n,f1}$, $I_{n,f2}$ protékajících vinutími. Vyšší ztráty jsou způsobené nerovnoměrným rozložením proudové hustoty v průřezu vodiče, což lze rozdělit na dvě složky, na již zmíněné ohmické ztráty, které by způsobil stejnosměrný proud, a ztráty přídavné, způsobené vířivými proudy. Vířivé proudy ve vodičích vznikají v důsledku rozptylového magnetického toku, který indukuje napětí, a to se v dobře vodivém materiálu projevuje vznikem právě vířivých proudů. Čím vyšší je vodivost materiálu, tím menší v něm vznikají ohmické ztráty, paradoxně v něm však vznikají větší ztráty přídavné.

Výpočet přídavných ztrát je nutné rozdělit do dvou složek, ztrát v axiálním a radiálním směru [5]. Pro jejich určení je potřeba určit vrcholové hodnoty magnetické indukce v obou směrech B_{ax} a B_r při uvažování lineárního rozložení v příčném a podélném příčném řezu vinutími, viz 5.6.



Obrázek 5.6 Rozložení magnetické indukce rozptylového toku na axiální a radiální složky [5].

Vrcholová hodnota amplitudy magnetické indukce v axiálním směru se nachází v mezeře hlavního kanálu (viz obrázek 5.9b) a pro její výpočet platí vztah podle [5]

$$B_{ax} = \frac{\mu_0 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{n,f1} \cdot N_{z1,n}}{H_{w1,e}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \sqrt{2} \cdot 909,327 \cdot 25}{750 \cdot 10^{-3}} = 0,0539 \text{ T.} \quad (5.89)$$

Pro výpočet přídavných ztrát je ještě zapotřebí přepočítat měrnou elektrickou vodivost hliníku σ_{Al} na rezistivitu $\rho_{Al,75}$ při referenční teplotě 75 °C

$$\rho_{Al,75} = \frac{1}{\sigma_{Al}} \cdot \frac{k_{\theta,Al} + 75}{k_{\theta,Al} + 20} = \frac{1}{35} \cdot \frac{225 + 75}{225 + 20} = 0,03499 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}. \quad (5.90)$$

Měrné přídavné ztráty v axiálním směru $p_{e,ax,1}$ a $p_{e,ax,2}$ se vypočítají stejným vztahem podle [5] pro obě vinutí, rozdíl je jen v dosazované šířce vodičů b_{v1} a b_{v2} (bez skelné izolace v případě vodiče ve VN vinutí)

$$p_{e,ax,1} = \frac{(2\pi \cdot f_n)^2 \cdot B_{ax}^2 \cdot b_{v1}^2}{3 \cdot 24 \cdot \rho_{Al,75} \cdot \rho_{m,Al}} = \frac{(2\pi \cdot 50)^2 \cdot 0,0539^2 \cdot 1,1^2}{3 \cdot 24 \cdot 0,03499 \cdot 2700} = 0,051 \text{ W/kg}, \quad (5.91)$$

$$p_{e,ax,2} = \frac{(2\pi \cdot f_n)^2 \cdot B_{ax}^2 \cdot b_{v2}^2}{3 \cdot 24 \cdot \rho_{Al,75} \cdot \rho_{m,Al}} = \frac{(2\pi \cdot 50)^2 \cdot 0,0539^2 \cdot 2,123^2}{3 \cdot 24 \cdot 0,03499 \cdot 2700} = 0,190 \text{ W/kg}. \quad (5.92)$$

Absolutní přídatné ztráty v axiálním směru $P_{e,ax,1}$ a $P_{e,ax,2}$ se zjistí vynásobením měrných přídatných ztrát hmotnostmi vinutí G_{w1} a G_{w2} následovně. A u vinutí VN je nutné vzít v potaz hmotnost celkového počtu závitů nehledě na zapojenou odbočku, protože vířivé proudy vznikají i v nezapojeném vodiči.

$$P_{e,ax,1} = p_{e,ax,1} \cdot G_{w1} = 0,051 \cdot 139,838 = 7,132 \text{ W}, \quad (5.93)$$

$$P_{e,ax,2} = p_{e,ax,2} \cdot G_{w2} = 0,190 \cdot 193,075 = 36,684 \text{ W}. \quad (5.94)$$

Obdobným způsobem jako probíhá výpočet přídatných ztrát v axiálním směru se postupuje u ztrát v radiálním směru. Nejprve se vypočítá vrcholová hodnota indukce B_r radiálního magnetického pole podle [28], které je způsobené převážně zkrácením elektrické výšky $H_{w2,e}$ vinutí VN oproti elektrické výšce $H_{w1,e}$ vnitřního NN vinutí, jak je vidět na obrázku 5.9c. Jestliže je relativní přesah X_w vnitřního vinutí NN na obou koncích symetrický, pak má hodnotu platící pro oba konce

$$X_w = \frac{H_{w1,e} - H_{w2,e}}{2 \cdot H_{w1,e}} = \frac{750 - 735}{2 \cdot 750} = 0,01. \quad (5.95)$$

Dále potom pro střední délku siločar rozptylového radiálního toku l_{rq} platí podle [28] poloempirický vztah (nahrazuje tak běžněji používaný Rogowského činitel, který však není velmi přesný pro radiální pole)

$$l_{rq} = \frac{H_{w1,e}}{2\pi} + \frac{D_{w2,e,e} - D_{w1,i,e}}{4} + \frac{D_{w1,i,e} - D_j}{2} = \frac{750}{2\pi} + \frac{302,824 - 144,3}{4} + \frac{144,3 - 140}{2} = 161,147 \text{ mm}. \quad (5.96)$$

Amplituda magnetické indukce rozptylového toku v radiálním směru je

$$B_r = \frac{\mu_0 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{n,f1} \cdot N_{z1,n} \cdot X_w}{l_{rq}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \sqrt{2} \cdot 909,327 \cdot 25 \cdot 0,01}{161,147 \cdot 10^{-3}} = 0,0025 \text{ T}. \quad (5.97)$$

Přídatné ztráty v radiálním směru ve vinutí VN $p_{e,r,2}$ jsou počítané stejným způsobem jako ve směru axiálním, jen je nahrazena šířka vodiče b_{v2} za jeho výšku h_{v2}

$$p_{e,r,2} = \frac{(2\pi \cdot f_n)^2 \cdot B_r^2 \cdot h_{v2}^2}{3 \cdot 24 \cdot \rho_{Al,75} \cdot \rho_{m,Al}} = \frac{(2\pi \cdot 50)^2 \cdot 0,0017^2 \cdot 4,249^2}{3 \cdot 24 \cdot 0,03499 \cdot 2700} = 0,00164 \text{ W/kg}, \quad (5.98)$$

A absolutní hodnota těchto přídavných ztrát $P_{e,r,2}$ je

$$P_{e,r,2} = p_{e,r,2} \cdot G_{w2} = 0,00164 \cdot 193,075 = 0,316 \text{ W}, \quad (5.99)$$

což je vzhledem k ohmickým ztrátám naprosto zanedbatelná hodnota. To stejné se však nedá říct o přídavných ztrátách v radiálním směru ve fóliovém vinutí NN $P_{e,r,1}$, kde by stejným postupem jako ve vztazích (5.98) a (5.99) vyšly přídavné ztráty 7133,2 W, což v tomto případě nelze aplikovat, jelikož uvedené vztahy neplatí pro výšku vodiče přesahující hloubku vniku daného materiálu, která je pro hliník při referenční teplotě 14,14 mm. Bohužel pro přesné určení přídavných ztrát v radiálním směru ve fóliovém vinutí $P_{e,r,1}$ funkční analytická metoda zatím neexistuje, tyto ztráty se pohybují kolem 10 % poměrem k ohmickým ztrátám $P_{ohm1,75}$, v krajním případě až 15 %. Z důvodu bezpečnosti při porovnávání vypočtených ztrát s maximální dovolenou hodnotou budou ztráty $P_{e,r,1}$ brány právě s touto krajní variantou

$$P_{e,r,1} = k_{e,r,1} \cdot P_{ohm1,75} = 0,15 \cdot 2201,308 = 330,196 \text{ W}, \quad (5.100)$$

kde $k_{e,r,1}$ je součinitelem přídavných ztrát ve fóliovém vinutí v radiálním směru.

5.6 Izolace a hlavní kanál

Pro pozdější výpočet hmotnosti a nákladů na výrobu celého jádra se v této kapitole stanoví hmotnosti použitého izolačního papíru mezi závity NN vinutí a kolem hlavního kanálu, kde tvoří izolaci na vnějším průměru vinutí NN o tloušťce $b_{i1,e}$ a vnitřním průměru VN vinutí o tloušťce $b_{i2,i}$. Pro připomenutí b_{il} značí tloušťku samotného izolačního papíru s pryskyřicí.

Celkový počet ovinů izolačního papíru kolem hlavního kanálu je $N_{i1,k}$

$$N_{i1,k} = \frac{b_{i1,e} + b_{i2,i}}{b_{i1}} = \frac{1,5 + 1,5}{0,15} = 20. \quad (5.101)$$

Délka této izolace je pak součin počtu ovinů a středního obvodu hlavního kanálu

$$\begin{aligned} L_{i1,k} &= N_{i1,k} \cdot \left((D_{w1,e,m} + b_{kanal}) \cdot \pi + 2 \cdot L_r \right) \\ &= 20 \cdot \left((209,5 + 6) \cdot \pi + 2 \cdot 143 \right) \cdot 10^{-3} = 19,260 \text{ m}, \end{aligned} \quad (5.102)$$

kde $D_{w1,e,m}$ je vnější mechanický průměr vinutí NN, b_{kanal} je šířka hlavního kanálu a L_r je délka rovné části vinutí.

Ve vinutí NN je pak mezi závity délka tohoto izolačního papíru $L_{i1,m}$ menší o jeden ovin oproti závitům vodivé fólie $N_{z1,n}$, tedy

$$L_{i1,m} = L_{w1} \cdot \frac{N_{z1,n} - 1}{N_{z1,n}} = 20,926 \cdot \frac{25 - 1}{25} = 20,089 \text{ m}, \quad (5.103)$$

kde L_{w1} značí délku fólie v NN vinutí.

Papír se dodává o výškách 300, 500 a 850 mm a z těchto svitků je pak potřebná výška vyřezávána při navíjení. Jelikož pro vinutí NN je navržená mechanická výška $B_{w1,m} = 767$ mm, bude spotřebováván svitek izolačního papíru o výšce $H_{i1} = 850$ mm. A jestliže je hustota izolačního papíru $\rho_{m,i1} = 1120$ kg/m³, pak je jeho hmotnost G_{i1} celkem ve všech m fázích

$$\begin{aligned} G_{i1} &= m \cdot (L_{i1,k} + L_{i1,m}) \cdot H_{i1} \cdot b_{i1} \cdot \rho_{m,i1} \\ &= 3 \cdot (19,260 + 20,089) \cdot 850 \cdot 10^{-3} \cdot 0,15 \cdot 10^{-3} \cdot 1120 \\ &= 16,857 \text{ kg}, \end{aligned} \quad (5.104)$$

Na obou koncích vinutí NN je ještě izolační páska vyplňující mezeru vzniklou nižší výškou fólie oproti izolačnímu papíru. Výška jedné pásky na jedné straně vinutí je h_{i1} a její šířka i délka jsou stejné jako šířka b_{v1} , respektive délka hliníkové fólie L_{w1} . Její hmotnost je pak $G_{i1,h}$ na obou koncích všech vinutí celkem

$$\begin{aligned} G_{i1,h} &= m \cdot 2 \cdot L_{w1} \cdot h_{i1} \cdot b_{v1} \cdot \rho_{m,i1} \\ &= 3 \cdot 2 \cdot 20,926 \cdot 8,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 1120 \\ &= 1,315 \text{ kg}. \end{aligned} \quad (5.105)$$

Pohledem na vinutí VN v axiálním řezu je mezipolohová a koncová izolace přibližně symetricky rozdělená a její obsah v řezu je $S_{i2,m}$

$$\begin{aligned} S_{i2,m} &= b_{i2,skut} \cdot (H_{w2,m} - h_{i2}) + 2 \cdot h_{i2} \cdot b_{v2,i} \cdot n_{pol} \\ &= 6,042 \cdot (767 - 16) + 2 \cdot 16 \cdot 2,208 \cdot 15 \\ &= 5,597 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2. \end{aligned} \quad (5.106)$$

Ve vztahu $b_{i2,skut}$ značí celkovou skutečnou tloušťku mezipolohové izolace ve vinutí VN, $H_{w2,m}$ je mechanická výška vinutí a h_{i2} je šířka izolační pásky. Dále $b_{v2,i}$ představuje šířku izolovaného drátu a n_{pol} počet poloh ve vinutí VN.

Hmotnost této izolace $G_{i2,m}$ je při její hustotě $\rho_{m,i1} = 1166,667 \text{ kg/m}^3$

$$\begin{aligned} G_{i2,m} &= m \cdot S_{i2,m} \cdot \left(\frac{D_{w2,i,e} + D_{w2,e,e}}{2} \cdot \pi + 2 \cdot L_r \right) \cdot \rho_{i2} \\ &= 3 \cdot 5,597 \cdot \left(\frac{224,5 + 302,824}{2} \cdot \pi + 2 \cdot 143 \right) \cdot 10^{-6} \cdot 1166,667 \\ &= 21,829 \text{ kg}, \end{aligned} \quad (5.107)$$

kde $D_{w2,i,e}$ a $D_{w2,e,e}$ jsou vnitřní a vnější elektrický průměr VN vinutí.

Ještě na vnějším průměru je vytvořena stejnou mezipolohovou páskou vrstva izolace o tloušťce $b_{i2,e}$ a její hmotnost $G_{i2,e}$ je

$$\begin{aligned} G_{i2,e} &= m \cdot \left((D_{w2,e,e} + b_{i2,e}) \cdot \pi + 2 \cdot L_r \right) \cdot b_{i2,e} \cdot H_{w2,m} \cdot \rho_{i2} \\ &= 3 \cdot \left((302,824 + 0,6) \cdot \pi + 2 \cdot 143 \right) \cdot 0,6 \cdot 767 \cdot 10^{-9} \\ &\quad \cdot 1166,667 \\ &= 1,996 \text{ kg}, \end{aligned} \quad (5.108)$$

kde $D_{w2,e,e}$ je elektrický vnější průměr vinutí VN.

Celková hmotnost izolační pásky G_{i2} na VN vinutí je součtem její části ve vinutí $G_{i2,m}$ a na vnějším průměru $G_{i2,e}$

$$G_{i2} = G_{i2,m} + G_{i2,e} = 21,829 + 1,996 = 23,825 \text{ kg}. \quad (5.109)$$

Ještě pro určení nákladů za žebříček vkládající se pro vytvoření hlavního kanálu je zapotřebí vypočítat jeho délku L_{hk} , která je ve všech fázích celkově

$$\begin{aligned} L_{hk} &= m \cdot \left((D_{w1,e,m} + b_{kanal}) \cdot \pi + 2 \cdot L_r \right) \\ &= 3 \cdot \left((209,5 + 6) \cdot \pi + 2 \cdot 143 \right) \cdot 10^{-3} = 2,889 \text{ m}. \end{aligned} \quad (5.110)$$

5.7 Ztráty naprázdno

K definování rozměrů celého magnetického obvodu po zjištění rozměrů NN a VN vinutí stačí už jenom stanovit mechanickou vzdálenost konců vinutí (od koncové izolace) od jha $h_{j-w,m}$, a také minimální mechanickou vzdálenost dvou sousedních fází $\delta_{f,m}$, tedy dvou vnějších VN vinutí.

Obě tyto vzdálenosti opět závisí na nejvyšších provozních napětích a zkušebních napětích obou vinutí. V [26] jsou sestaveny tabulky vhodných vzdáleností podle zmíněných napětí a z nich se tyto vzdálenosti vybírají podle nejbližší vyšší či stejné hodnoty napětí navrhovaného stroje.

Jelikož mechanické výšky $h_{w1,m}$ a $h_{w2,m}$ NN i VN vinutí jsou stejné, stačí pro stanovení mechanické vzdálenosti konce vinutí od jha pouze vybrat větší hodnotu z $h_{j-w1,m}$ a $h_{j-w2,m}$, které jsou vybrány podle napětí NN respektive VN vinutí z tabulek. Minimální vzdálenost mezi jhem a koncem vinutí je určena jednoznačně podle VN vinutí $h_{j-w2,m} = h_{j-w,m} = 9$ mm, protože pro NN vinutí je minimem $h_{j-w1,m} = 4$ mm.

Pro stanovení minimální mezifázové mechanické vzdálenosti $\delta_{f,m}$ už stačí vybrat z tabulky pouze podle napětí VN vinutí. Výsledkem je $\delta_{f,m} = 8$ mm.

Prvním parametrem charakterizující velikost magnetického obvodu je výška okna $H_{o,j}$, která je součtem mechanické výšky vinutí $H_{w1,m}$ a dvojnásobku vzdálenosti mezi koncem vinutí a jhem $h_{j-w,m}$

$$H_{o,j} = H_{w1,m} + 2 \cdot h_{j-w1,m} = 767 + 2 \cdot 9 = 785 \text{ mm.} \quad (5.111)$$

Druhým charakteristickým parametrem je rozteč sloupků M_j , ta je součtem obou vnějších mechanických poloměrů sousedních VN vinutí, což je dohromady průměr $D_{w2,e,m}$, a vzdálenosti mezi nimi $\delta_{f,m}$

$$M_j = D_{w2,e,m} + \delta_{f,m} = 304,024 + 8 = 312,024 \doteq 312 \text{ mm,} \quad (5.112)$$

zde je možné, vzhledem k minimální hodnotě přesahující celé číslo, výsledek zaokrouhlit dolů na celé milimetry.

Pro určení hmotnosti a následně ztrát magnetického obvodu je vhodné jej rozdělit do čtyř typů segmentů. Tím prvním jsou tři samostatné sloupky o výšce okna $H_{o,j}$. Druhým jsou čtyři jha spojující jednotlivé fáze o délce šířky okna $B_{o,j}$, které má velikost rozdílu rozteče sloupků M_j a poloměru jádra z obou stran, tedy dohromady jednoho průměru D_j

$$B_{o,j} = M_j - D_j = 312 - 140 = 172 \text{ mm.} \quad (5.113)$$

Třetím segmentem jsou čtyři spoje krajních sloupků a jha tvaru L v rozích magnetického obvodu a čtvrtým jsou dva spoje prostředního sloupku se jhy ve tvaru T. Střední délka všech spojů je zjednodušeně průměr jádra D_j .

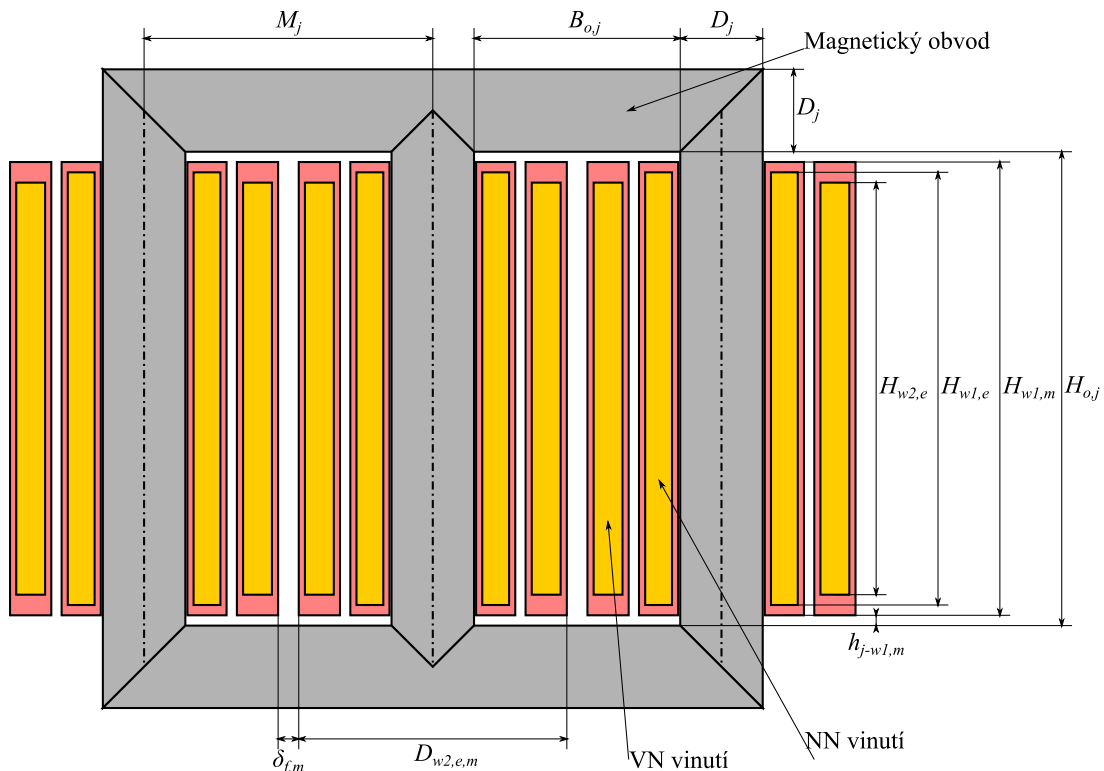
Objem celého magnetického obvodu V_{Fe} je součinem sumy všech délek jednotlivých segmentů jádra a obsahu magnetické oceli v průřezu jádra S_{Fe} , zapsáno jako

$$\begin{aligned}
 V_{Fe} &= (3 \cdot H_{o,j} + 4 \cdot B_{o,j} + 4 \cdot D_j + 2 \cdot D_j) \cdot S_{Fe} \\
 &= (3 \cdot 785 + 4 \cdot 172 + 4 \cdot 140 + 2 \cdot 140) \cdot 10^{-3} \cdot 32028,274 \cdot 10^{-6} \quad (5.114) \\
 &= 124,366 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3.
 \end{aligned}$$

Vynásobením objemu V_{Fe} hustotou magnetické oceli $\rho_{m,Fe} = 7650 \text{ kg/m}^3$ je získána hmotnost magnetického obvodu G_{Fe}

$$G_{Fe} = V_{Fe} \cdot \rho_{m,Fe} = 124,366 \cdot 10^{-3} \cdot 7650 = 951,400 \text{ kg.} \quad (5.115)$$

Pro větší přehlednost jsou rozměry magnetického obvodu ilustrovány na obrázku 5.7.



Obrázek 5.7 Parametry magnetického obvodu v podélném řezu aktivní části

Posledním krokem je už jen vypočtení ztrát naprázdno P_o , do kterých je třeba kromě měrných ztrát p_o v železe zahrnout také přídavné ztráty vznikající v rozích a kolem vystředovacích otvorů, případně i díky dalším vlivům. Měrné ztráty p_o jsou závislé na velikosti magnetické indukce B_j v jádře a dají se vyčíst z grafu či tabulky dodané výrobcem zvolených transformátorových plechů.

Pro navrhovaný model byl podle optimalizačního programu zvolený typ plechu Hi-B pod značením H085-23L, tedy s měrnými ztrátami 85 W/kg při hodnotě magnetické indukce 1,7 T a tloušťkou jednoho plechu 0,23 mm. Pro vypočítanou magnetickou indukci $B_j = 1,30 \text{ T}$ odpovídají měrné ztráty v oceli $p_o = 0,43647 \text{ kg/W}$.

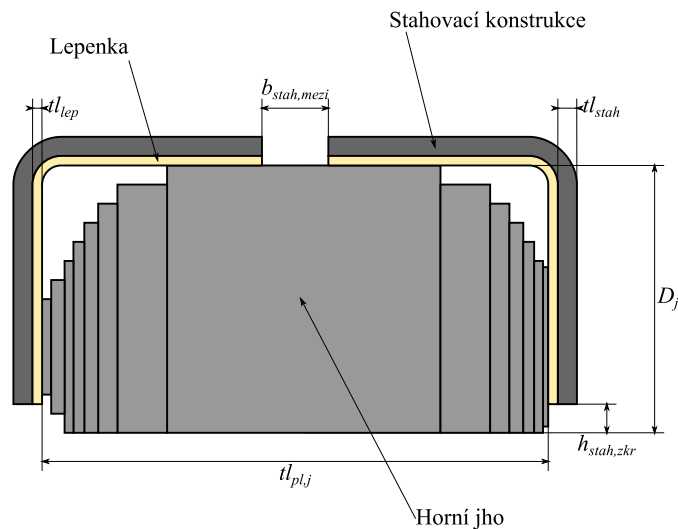
Přídavné ztráty v jádře lze nejlépe zohlednit součinitelem $k_{e,p_o} = 1,3$ a jeho hodnota je stanovena na základě zkušeností výrobce, protože se do ní odráží jak použitá technologie vysekávání, skládání, preciznost, tak i odchylky kvality plechů od garantované hodnoty.

Výsledné vypočítané ztráty naprázdno jsou součinem hmotnosti magnetického obvodu G_{Fe} , měrných ztrát p_o a součinitele přídavných ztrát naprázdno $k_{e,po}$

$$P_o = G_{Fe} \cdot p_o \cdot k_{e,po} = 951,400 \cdot 0,43647 \cdot 1,3 = 539,835 \text{ W}, \quad (5.116)$$

což je i s rezervou 10 % menší hodnota, než je limit jmenovitých ztrát naprázdno $P_{on} = 600 \text{ W}$.

Pod tuto kapitolu by se ještě dalo zahrnout stanovení hmotnosti stahovací konstrukce. Ta je tvořena dvěma železnými L-profilů, které se stahují proti sobě. Mezi nimi je mezera o velikosti $b_{stah,mezi} = 20 \text{ mm}$ a od hrany jha směrem u vnutí je stahovací konstrukce zkrácená o $h_{stah,zkr} = 5 \text{ mm}$. Zmíněné rozměry i další jsou vyznačeny na obrázku 5.8.



Obrázek 5.8 Parametry stahovací konstrukce v příčném řezu horního jha

Jestliže pro daný výkon je tloušťka železa stahovací konstrukce $tl_{stah} = 5 \text{ mm}$, pak má průřez jednoho L-profilu obsah S_{stah}

$$\begin{aligned} S_{stah} &= \left(D_j - h_{stah,zkr} + \frac{tl_{pl,j} - b_{stah,mezi}}{2} + 2 \cdot tl_{lep} + tl_{stah} \right) \cdot tl_{stah} \\ &= \left(140 - 5 + \frac{262,734 - 20}{2} + 2 \cdot 1 + 5 \right) \cdot 5 \\ &= 1316,835 \text{ mm}^2, \end{aligned} \quad (5.117)$$

kde $tl_{lep} = 1 \text{ mm}$ je ještě tloušťka lepenky, kterou je vystlaná stahovací konstrukce.

Magnetický obvod stahují celkem 4 tyto L-profilů a jejich hmotnost je G_{stah}

$$\begin{aligned} G_{stah} &= 4 \cdot S_{stah} \cdot (2 \cdot M_j + D_{w2,e,m} + 2 \cdot l_{stah,pres}) \cdot \rho_{m,Fe,stah} \\ &= 4 \cdot 1316,835 \cdot (2 \cdot 304,024 + 140 + 2 \cdot 10) \cdot 10^{-9} \cdot 7800 \\ &= 38,950 \text{ kg}. \end{aligned} \quad (5.118)$$

kde $l_{stah,pres} = 10 \text{ mm}$ je přesah délky stahovací konstrukce přes vnější vnutí VN a $\rho_{m,Fe,stah} = 7800 \text{ kg/m}^3$ je hustota železa, ze kterého se L-profilů vyrábí.

5.8 Ztráty nakrátko

Když už jsou známé rozměry celého magnetického obvodu, můžou se dopočítat rozměry NN vývodů a jejich propojů, a také v nich vzniklé ztráty. Zatímco šířka b_{vyv} a tloušťka tl_{vyv} vývodů už byly definovány v kapitole 5.1 podle jmenovitého proudu, délka jednoho vývodu L_{vyv} se dá přibližně vypočítat jako součet mechanické výšky vinutí $H_{w1,m}$ a průměr jádra D_j

$$L_{vyv} = H_{w1,m} + D_j = 767 + 140 = 907 \text{ mm.} \quad (5.119)$$

Odpor vývodu R_{vyv} při teplotě 20 °C musí zohlednit v idealizovaném případě lineární nárůst proudové hustoty od spodního konce vinutí po konec horní, dál už teče celá hodnota proudu NN vinutí. Integrací kvadrátu proudové hustoty po části délky vývodu $H_{w1,m}$ se dá dokázat, že ekvivalentem ztrát dané části při plné proudové hustotě je třetina $H_{w1,m}$. Odpor vývodu R_{vyv} je pak

$$R_{vyv} = \frac{1}{\sigma_{Al,vyv}} \cdot \frac{\frac{H_{w1,m}}{3} + D_j}{b_{vyv} \cdot tl_{vyv}} = \frac{1}{34} \cdot \frac{\left(\frac{767}{3} + 140\right) \cdot 10^{-3}}{60 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^{-3}} = 24,245 \mu\Omega. \quad (5.120)$$

kde $\sigma_{Al,vyv} = 34 \text{ S} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}$ je měrná vodivost hliníku ve vývodech (podle zkušeností bývá horší kvality než hliník použitý ve vinutí) při teplotě 20 °C.

Jelikož jsou vinutí NN zapojené do hvězdy, jeden z vývodů každé fáze je spojen do nulového bodu propojem ze stejné pásoviny jako vývody, tudíž je také z hliníku a má stejné rozměry v průřezu. Délka nulového propoje $L_{N,pr}$ je součtem roztečí krajních sloupků $2 \cdot M_j$ a na každé straně poloviny šířky pásoviny b_{vyv}

$$L_{N,pr} = 2 \cdot M_j + b_{vyv} = 2 \cdot 312 + 60 = 684 \text{ mm.} \quad (5.121)$$

Na jednu fázi se bude uvažovat třetina nulového propoje. Odpor jedné této části propoje $R_{N,pr}$ při 20 °C je

$$R_{N,pr} = \frac{1}{\sigma_{Al,vyv}} \cdot \frac{\frac{L_{N,pr}}{3}}{b_{vyv} \cdot tl_{vyv}} = \frac{1}{34} \cdot \frac{\frac{684}{3} \cdot 10^{-3}}{60 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^{-3}} = 13,971 \mu\Omega. \quad (5.122)$$

Jelikož jsou NN vývody a nulový propoj ze stejného materiálu včetně průřezu, můžeme jejich hmotnost $G_{vyv,Npr}$ pro pozdější stanovení výrobních nákladů zahrnout do jednoho výpočtu s hustotou hliníku $\rho_{m,Al}$

$$\begin{aligned} G_{vyv,Npr} &= (m \cdot 2 \cdot L_{vyv} + L_{N,pr}) \cdot b_{vyv} \cdot tl_{vyv} \cdot \rho_{m,Al} \\ &= (3 \cdot 2 \cdot 907 + 684) \cdot 60 \cdot 8 \cdot 10^{-9} \cdot 2700 = 7,939 \text{ kg.} \end{aligned} \quad (5.123)$$

Propoje napojující NN vývody na průchodky jsou vždy z mědi, nehledě na materiál vinutí a vývodů. Jejich délka a průřez jsou stanoveny podle výkonu transformátoru

tabulkou v [26]. Pro zadaný výkon $S_n = 630$ kVA je délka propoje $L_{f,pr} = 280$ mm a průřez $S_{f,pr} = 300$ mm². Odpor jednoho fázového propoje $R_{f,pr}$ je při 20 °C

$$R_{f,pr} = \frac{1}{\sigma_{Cu}} \cdot \frac{L_{f,pr}}{S_{f,pr}} = \frac{1}{57} \cdot \frac{280 \cdot 10^{-3}}{300 \cdot 10^{-6}} = 16,374 \mu\Omega, \quad (5.124)$$

kde $\sigma_{Cu} = 57$ S·m·mm⁻² je měrná elektrická vodivost mědi při teplotě 20 °C.

Hmotnost měděných propojů $G_{f,pr}$ s hustotou $\rho_{m,Cu} = 8900$ kg/m³ je celkem

$$\begin{aligned} G_{f,pr} &= m \cdot L_{f,pr} \cdot S_{f,pr} \cdot \rho_{m,Cu} = 3 \cdot 280 \cdot 10^{-3} \cdot 300 \cdot 10^{-6} \cdot 8900 \\ &= 2,243 \text{ kg.} \end{aligned} \quad (5.125)$$

V jedné fázi tak vznikají ztráty kromě těch, které vznikají přímo v NN a VN vinutí, také ve vstupním a nulovém NN vývodu, které jsou totožné, a dále v propoji mezi NN průchodkou a vývodem, a ještě v části nulového NN propoje. Ztráty vývodů z VN vinutí jsou zanedbatelné vzhledem k velikosti proudu, délce a průřezu drátu mezi vinutím a průchodkami či přepojovačem odboček. K výpočtu ztrát v NN vývodech a propojích $P_{vyv,pr}$ ve všech m fázích lze použít odpory těchto částí R_{vyv} , $R_{N,pr}$ a $R_{f,pr}$, musí se však přepočítat podle svého materiálu na referenční teplotu 75 °C. Při jmenovitém zatížení proudem $I_{f,n1}$ jsou ztráty $P_{vyv,pr}$ podle vztahu

$$\begin{aligned} P_{vyv,pr} &= m \cdot \left((2R_{vyv} + R_{N,pr}) \cdot \frac{k_{\theta,Al} + 75}{k_{\theta,Al} + 20} + R_{f,pr} \cdot \frac{k_{\theta,Cu} + 75}{k_{\theta,Cu} + 20} \right) \cdot I_{f,n1}^2 \\ &= 3 \cdot \left((2 \cdot 24,245 + 13,971) \cdot \frac{225 + 75}{225 + 20} + 16,374 \cdot \frac{235 + 75}{235 + 20} \right) \\ &\quad \cdot 10^{-6} \cdot 909,327^2 = 239,104 \text{ W,} \end{aligned} \quad (5.126)$$

kde $k_{\theta,Al} = 225$ °C a $k_{\theta,Cu} = 235$ °C je teplotní součinitel hliníku, respektive mědi.

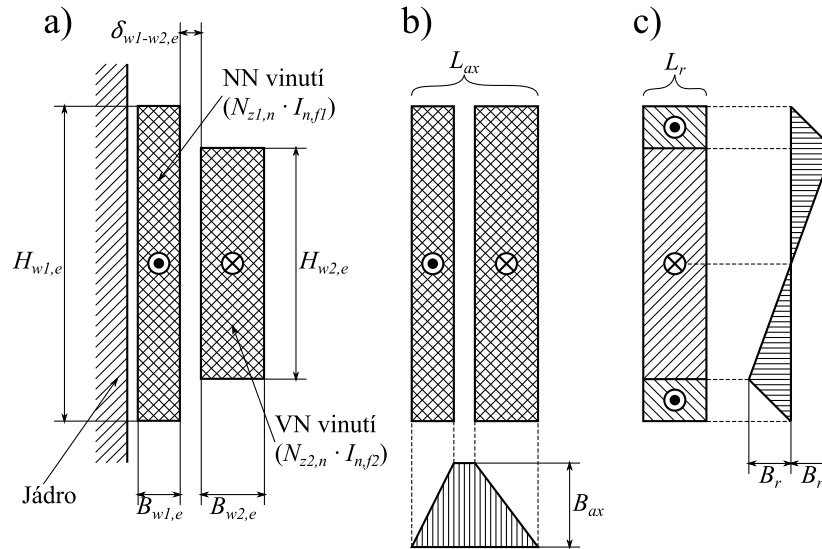
Součtem ohmických ztrát $P_{ohm1,75}$, $P_{ohm2,75}$, přídatných ztrát v axiálním $P_{e,ax,1}$, $P_{e,ax,2}$ i radiálním $P_{e,r,1}$, $P_{e,r,2}$ směru obou vinutí a ztrát v NN vývodech a propojích $P_{vyv,pr}$ jsou celkové ztráty nakrátko P_k

$$\begin{aligned} P_k &= P_{ohm1,75} + P_{ohm2,75} + P_{e,r,1} + P_{e,ax,1} + P_{e,ax,2} + P_{e,r,1} + P_{e,r,2} \\ &\quad + P_{vyv,pr} \\ &= 2201,308 + 2967,798 + 7,132 + 36,684 + 330,196 + 0,316 \\ &\quad + 239,104 = 5782,538 \text{ W,} \end{aligned} \quad (5.127)$$

což je s rezervou 11 % nižší hodnota ztrát, než je limit jmenovitých ztrát nakrátko $P_{kn} = 6500$ W.

5.9 Napětí nakrátko

Pro představu rozptylového toku, který vzniká mezi NN a VN vinutími, je nejprve vhodné uvažovat, že jsou vinutí obklopené železem. Za tohoto předpokladu mají siločáry rozptylového toku přímkový průběh, rovnoběžný s osou vinutí. Rozložení magnetického pole v prostoru ohraničeném železem má tvar lichoběžníku, jak je vidět na obrázku 5.9.



Obrázek 5.9 a) Uspořádání vinutí, jehož rozložení rozptylového magnetického pole lze rozdělit do dvou složek b) axiální c) příčnou

K získání rovnice pro výpočet rozptylové indukčnosti se dá podle [11] využít dvou vztahů pro magnetickou energii cívky W_m ve vakuu, tedy lineárním magnetickým prostředí.

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot \int_V h^2 dv, \quad (5.128)$$

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot L_r \cdot I_{f,n1}^2, \quad (5.129)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua, h je okamžitá hodnota magnetické intenzity v elementu dv celkového objemu V obou vinutí včetně mezery mezi nimi, i je proud tekoucí vinutím NN. Rozptylová indukčnost L_r je pak po úpravě rovnic

$$L_r = \frac{\mu_0}{i^2} \cdot \int_V h^2 dv. \quad (5.130)$$

A jelikož je průběh magnetické intenzity po náhradní střední délce obvodu vinutí o_{str} stejný, a podobně i podél výšky vinutí $H_{w1,e}$ při uvažování zjednodušení rovnoběžnosti siločar, je možné vztah (5.130) dále upravit na

$$L_r = \frac{\mu_0}{i^2} \cdot o_{str} \cdot H_{w1,e} \cdot \int_0^{B_{w1,e} + \delta_{w1-w2,e} + B_{w2,e}} h^2(x) dx, \quad (5.131)$$

kde $B_{w1,e}$ a $B_{w2,e}$ jsou elektrické šířky vinutí NN a VN, $\delta_{w1-w2,e} = 9$ mm je elektrická vzdálenost mezi nimi. Hodnota magnetické intenzity h ve vzdálenosti x od vnitřního elektrického obvodu vinutí NN se vypočítá

$$\text{pro } 0 \leq x < B_{w1,e}: \quad h(x) = H_{max} \cdot \frac{x}{B_{w1,e}}, \quad (5.132)$$

$$\text{pro } B_{w1,e} \leq x < (B_{w1,e} + \delta_{w1-w2,e}): \quad h(x) = H_{max}, \quad (5.133)$$

$$\text{pro } (B_{w1,e} + \delta_{w1-w2,e}) \leq x \leq (B_{w1,e} + \delta_{w1-w2,e} + B_{w2,e}):$$

$$h(x) = H_{max} \cdot \frac{B_{w1,e} + \delta_{w1-w2,e} + B_{w2,e} - x}{B_{w2,e}}. \quad (5.134)$$

kde H_{max} je maximální hodnota magnetické intenzity rozptylového pole a pro její výpočet platí

$$H_{max} = \frac{i \cdot N_{z1,n}}{H_{w1,e}}, \quad (5.135)$$

kde i je okamžitý proud vinutím NN a $N_{z1,n}$ je počet závitů tohoto vinutí. $H_{w1,e}$ je elektrická výška vinutí NN, tedy toho vyššího.

Po dosazení a po integraci rovnic (5.132) až (5.135) do vztahu (5.131) se získá

$$L_r = \frac{\mu_0}{H_{w1,e}} \cdot o_{str} \cdot N_{z1,n} \cdot \left(\frac{B_{w1,e}}{3} + \delta_{w1-w2,e} + \frac{B_{w2,e}}{3} \right), \quad (5.136)$$

Náhradní délka středního obvodu o_{str} se podle [11] přibližně určí jako aritmetický průměr středních délek závitů NN a VN vinutí

$$\begin{aligned} o_{str} &= \frac{D_{w1,i,e} + D_{w1,e,e} + D_{w2,i,e} + D_{w2,e,e}}{4} \cdot \pi + 2 \cdot L_r \\ &= \frac{144,3 + 206,5 + 224,5 + 302,824}{4} \cdot \pi + 2 \cdot 143 \\ &= 975,677 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (5.137)$$

Průměrnou délku siločar axiálního pole, které nejsou ve skutečnosti rovnoběžné, zohledňuje pro sousá vinutí Rogowského činitel k_{rg}

$$\begin{aligned} k_{rg} &= 1 - \frac{B_{w1,e} + \delta_{w1-w2,e} + B_{w2,e}}{\pi \cdot H_{w1,e}} = 1 - \frac{31,1 + 9 + 39,162}{\pi \cdot 750} \\ &= 0,966. \end{aligned} \quad (5.138)$$

Takto zohledněná hlavní indukčnost v axiálním směru $L_{r,ax}$ se pak vypočítá

$$\begin{aligned}
L_{r,ax} &= \frac{\mu_0}{H_{w1,e}} \cdot k_{rg} \cdot o_{str} \cdot N_{z1,n} \cdot \left(\frac{B_{w1,e}}{3} + \delta_{w1-w2,e} + \frac{B_{w2,e}}{3} \right) \\
&= \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{750 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,966 \cdot 975,677 \cdot 10^{-3} \cdot 25 \cdot \left(\frac{31,1}{3} + 9 + \frac{39,162}{3} \right) \\
&\cdot 10^{-3} = 1,280 \mu\text{H}.
\end{aligned} \tag{5.139}$$

Nesymetrie na obou koncích vinutí, vzniklá díky zkrácení VN vinutí, má za následek ještě vzniku přídavné rozptylové indukčnosti v příčném směru, která se dá podle [11] vypočítat vztahem

$$\begin{aligned}
L_{r,r} &= \frac{\mu_0 \cdot o_{str} \cdot N_{z1,n} \cdot X_w^2 \cdot H_{w1,e}}{3 \cdot l_{rq}} \\
&= \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 975,677 \cdot 10^{-3} \cdot 25 \cdot 0,01^2 \cdot 750 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 161,147 \cdot 10^{-3}} = 0,0048 \mu\text{H},
\end{aligned} \tag{5.140}$$

přičemž X_w je relativní přesah vnitřního vinutí na jednom konci a l_{rq} je střední délka siločar příčného rozptylového pole, obojí vypočtené ve vztazích (5.95) a (5.96).

Součtem hlavní a přídavné indukčnosti je celková rozptylová indukčnost $L_{r,c}$

$$L_{r,c} = L_{r,ax} + L_{r,r} = 1,280 + 0,0048 = 1,2848 \mu\text{H}, \tag{5.141}$$

Procentní rozptylové napětí u_x je poměr rozptylového toku, který je součinem maximální okamžité hodnoty jmenovitého proudu $I_{f,n1}$ a celkové rozptylové indukčnosti $L_{r,c}$, s tokem hlavním, který se vypočítá jako součin magnetické indukce B_j v jádře a obsahu příčné plochy jádra S_{Fe}

$$\begin{aligned}
u_x &= \frac{\sqrt{2} \cdot I_{f,n1} \cdot L_{r,c}}{B_j \cdot S_{Fe}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{2} \cdot 909,327 \cdot 1,2848 \cdot 10^{-6}}{1,30 \cdot 32028,274 \cdot 10^{-6}} \cdot 100 \\
&= 3,968 \%,
\end{aligned} \tag{5.142}$$

Činná složka procentního napětí nakrátko u_r se dá zjistit z vypočítaných ztrát nakrátko P_k poměrem ke jmenovitému výkonu S_n

$$u_r = \frac{P_k}{S_n} \cdot 100 = \frac{5782,538}{630000} \cdot 100 = 0,918 \%. \tag{5.143}$$

Celkové procentní napětí nakrátko u_k se získá s využitím Pythagorovy věty pro vektorové sčítání v komplexní rovině činné u_r a jalové u_x složky napětí nakrátko

$$u_k = \sqrt{u_r^2 + u_x^2} = \sqrt{0,918^2 + 3,968^2} = 4,073 \%. \tag{5.144}$$

Výsledek je tak v normou stanovených mezích pro požadované napětí nakrátko $u_{kn} = 4 \%$, kde se naměřená hodnota vyrobeného transformátoru může pohybovat $\pm 10 \%$ od požadované hodnoty. Napětí nakrátko se tedy musí nacházet mezi $3,6 \%$ až $4,4 \%$, a to navrhovaný model splňuje s rezervou na obě strany.

5.10 Nádoba

Aby byla výroba nádoby a celkově návrh její podoby jednodušší, mnoho parametrů definujících rozměry částí nádoby je standardizovaných pro všechny výkony, které jsou používány pro distribuční účely, nebo jsou tyto parametry shodné pro určitý interval výkonů transformátoru. Jedná se o parametry vypsane v tabulkách 5.7 a 5.8.

Tabulka 5.7 Rozměry nádoby a dalších částí transformátoru, které jsou standardizované pro všechny výkony distribučních transformátorů

Parametr	Značení	Jednotka	Hodnota
Vnitřní tloušťka vlny	$tl_{vln,i}$	[mm]	7,5
Minimální vzdálenost krajní vlny od hrany nádoby zleva	$E_{vln,A}$	[mm]	30
Minimální vzdálenost krajní vlny od hrany nádoby zprava	$E_{vln,B}$	[mm]	30
Výška límce (nosný rám)	H_{limec}	[mm]	65
Gumo-korkové těsnění mezi límcem a víkem po stranách	tl_{gmk}	[mm]	10
Guma pod aktivní částí	tl_{guma}	[mm]	13
Prostor mezi horní stahovací konstrukcí a víkem	$H_{stah-viko}$	[mm]	130
Průměr tyče na zpevnění vln	D_{tyc}	[mm]	8
Vzdálenost spodní stahovací konstrukce od vany	$B_{stah-vana}$	[mm]	25
Vzdálenost ohybu pod vlnami pro zúžení vany	$H_{vln-truh}$	[mm]	30
Překrytí vln přes hrany vany a límce	$H_{prekryv_vln}$	[mm]	7,5
Přesah víka přes hrdlo límce	$b_{viko,pres}$	[mm]	50

Tabulka 5.8 Rozměry nádoby a dalších částí, které jsou návrhu přiřazeny podle výkonu transformátoru

Parametr	Značení	Jednotka	Hodnota
Tloušťka stahovací konstrukce	tl_{stah}	[mm]	5
Tloušťka plechu vany	tl_{vana}	[mm]	5
Tloušťka stěny vlnovce	tl_n	[mm]	1,2
Tloušťka plechu víka	tl_{viko}	[mm]	5
Šířka podvozku	B_{podvoz}	[mm]	820
Tloušťka podvozku	tl_{podvoz}	[mm]	7,5
Výška VN průchodek (vyšší než NN)	$H_{pruch,VN}$	[mm]	380
Výška koleček s nosníkem	H_{kol}	[mm]	158

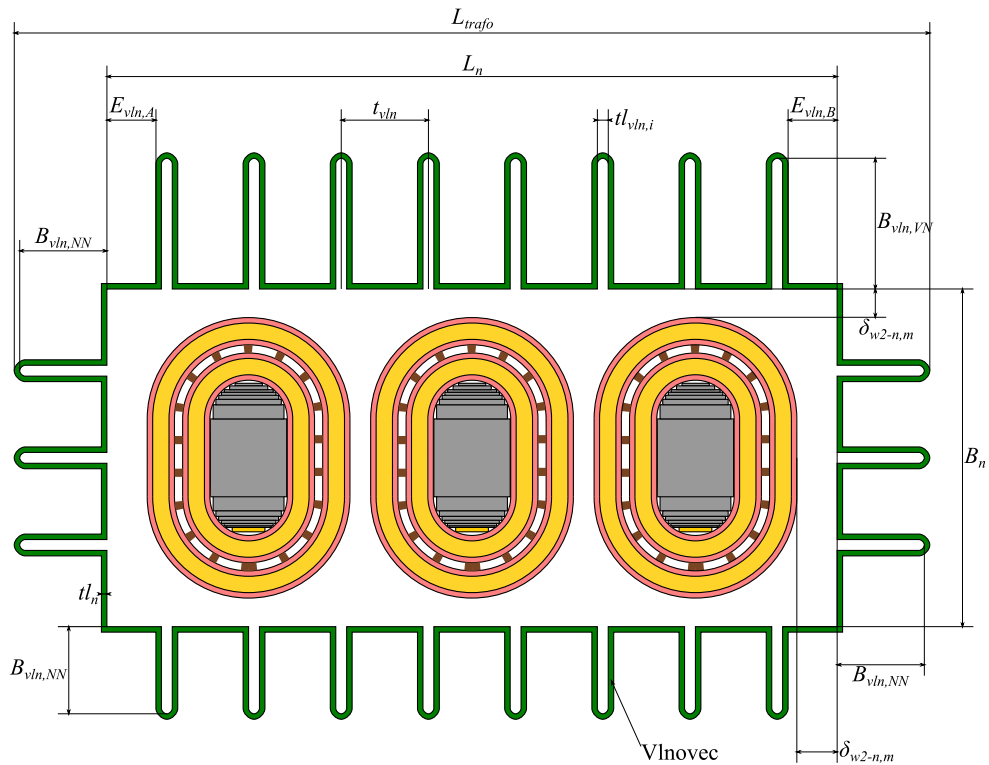
Parametry, které jsou nezávisle volitelné, jsou rozměry vln. Jejich volbou se dá měnit chladičí plocha nádoby a tím především střední oteplení oleje v nádobě, které zase ovlivňuje chlazení samotných vinutí. Volitelné jsou šířka a rozteč vln na všech stranách. Na každé stěně nádoby je možné tyto parametry navrhnout rozdílně, avšak bývá běžné zachovat určitou symetričnost, nejčastěji jsou šířka $B_{vln,NN}$ a rozteč vln tl_{vln} shodné na tzv. NN stěně (blíže NN průchodkám) a obou bočních stěnách. Na zbylé VN stěně bývá

zvykem dát vlny o něco širší než na NN straně, aby se tato strana viditelně odlišila pro proces sváření, po tom, co už jsou stěny samostatně hotové.

Volba rozteče vln t_{vln} se může pohybovat mezi 45 až 90 mm po 5 mm. Podle optimalizačního programu je nejvýhodnější použít nejmenší rozteč $t_{vln} = 45$ mm, takže bude na každé straně největší možný počet vln. Výhodu lze též spatřit v úspoře místa snížením celkových vnějších rozměrů transformátoru.

Dále optimalizační program našel nejlepší řešení v použití šířky $B_{vln,NN} = 90$ mm na NN straně a bočních stěnách, a šířky vln $B_{vln,VN} = 120$ mm na VN stěně.

Parametry uvedené v tabulkách 5.7, 5.8. a předchozím textu jsou vyznačeny na obrázcích 5.10 a 5.11, kde je transformátor s nádobou ilustrována v dvou řezech.



Obrázek 5.10 Horizontální řez transformátorem s vyznačením rozměrů nádoby

Zbylé rozměry nádoby se vypočítají podle aktivní části transformátoru. Nejprve se jedná o vnitřní délku L_n a šířku B_n nádoby, kde se k délce a šířce aktivní části na každé straně přičte mechanická vzdálenost stěny od vnějšího VN vinutí $\delta_{w2-n,m} = 40$ mm, která je podle napětí vybrána z tabulek [26]

$$\begin{aligned} L_n &= 3 \cdot D_{w2,e,m} + 2 \cdot \delta_{f,m} + 2 \cdot \delta_{w2-n,m} \\ &= 3 \cdot 304,024 + 2 \cdot 8 + 2 \cdot 40 = 1008,07 \doteq 1009 \text{ mm}, \end{aligned} \quad (5.145)$$

$$\begin{aligned} B_n &= D_{w2,e,m} + L_r + 2 \cdot \delta_{w2-n,m} \\ &= 304,024 + 143 + 2 \cdot 40 = 527,02 \doteq 528 \text{ mm}, \end{aligned} \quad (5.146)$$

přičemž výsledky se zaokrouhlují nahoru na celé milimetry. $D_{w2,e,m}$ je vnější mechanický průměr kruhové části vinutí VN, L_r je délka rovné části vinutí a $\delta_{f,m}$ je vzdálenost mezi dvěma fázemi.

Podobně se určí vnitřní výška nádoby, kde jsou postupně odspodu tloušťky gumy tl_{guma} , stahovací konstrukce tl_{stah} , výška magnetického obvodu, horní stahovací konstrukce a od té je víko nádoby vzdálené $H_{stah-viko}$

$$\begin{aligned} H_n &= tl_{guma} + H_{o,j} + 2 \cdot D_j + 2 \cdot tl_{stah} + 2 \cdot tl_{lep} + H_{stah-viko} \\ &= 13 + 785 + 2 \cdot 140 + 2 \cdot 5 + 2 \cdot 1 + 130 = 1220 \text{ mm}, \end{aligned} \quad (5.147)$$

kde tl_{lep} je tloušťka lepenky, kterou je vystlaná stahovací konstrukce.

Z této výšky se následně dá vypočítat maximální výška vlny H_{vln} , které se dá při respektování dalších vzdáleností dosáhnout. Výpočet se dá odvodit podle obrázku 5.11.

$$\begin{aligned} H_{vln} &= H_n + 2 \cdot H_{prekryv,vln} - tl_{gmk} - H_{limec} - H_{vln-truh} \\ &\quad - (tl_{guma} - tl_{stah} - tl_{lep} - D_j) + h_{j-w1,m} - \delta_{w2-n,m} \\ &= 1220 + 2 \cdot 7,5 - 10 - 65 - 30 - (13 - 5 - 1 - 140 + 9 - 40) \\ &= 1002 \doteq 1000 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (5.148)$$

Jelikož je možné vyrábět vlny pouze o výšce po 100 mm, bylo nutné výslednou hodnotu zaokrouhlit dolů na požadovanou cifru, $h_{j-w1,m}$ je vzdálenost mezi koncem vinutí a jhem.

Z délky vln se pokračuje výpočtem výšky vany H_{vana}

$$\begin{aligned} H_{vana} &= H_n + 2 \cdot H_{prekryv,vln} - H_{vln} - H_{limec} - tl_{gmk} \\ &= 1220 + 2 \cdot 7,5 - 1000 - 65 - 10 = 160 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (5.149)$$

Odečtením vzdálenosti ohybu pod vlnami pro zúžení vany $H_{vln-truh}$ od výšky vany H_{vana} je výsledkem výška zúžené části vany, tzv. truhlíku $H_{truhlik}$

$$H_{truhlik} = H_{vana} - H_{vln-truh} = 160 - 30 = 130 \text{ mm}. \quad (5.150)$$

Pokud by vyšla výška truhlíku menší než 40 mm, což je použitelné minimum, vana by byla bez zúžení. V tomto případě se na dně vany truhlík uplatní se zkrácením o šířku na jedné straně B_{zkrac}

$$\begin{aligned} B_{zkrac} &= \frac{B_n - tl_{pl,j} - 2 \cdot tl_{stah} - 2 \cdot tl_{lep} - 2 \cdot B_{stah-vana}}{2} \\ &= \frac{528 - 262,734 - 2 \cdot 5 - 2 \cdot 1 - 2 \cdot 25}{2} = 101,633 \doteq 101 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (5.151)$$

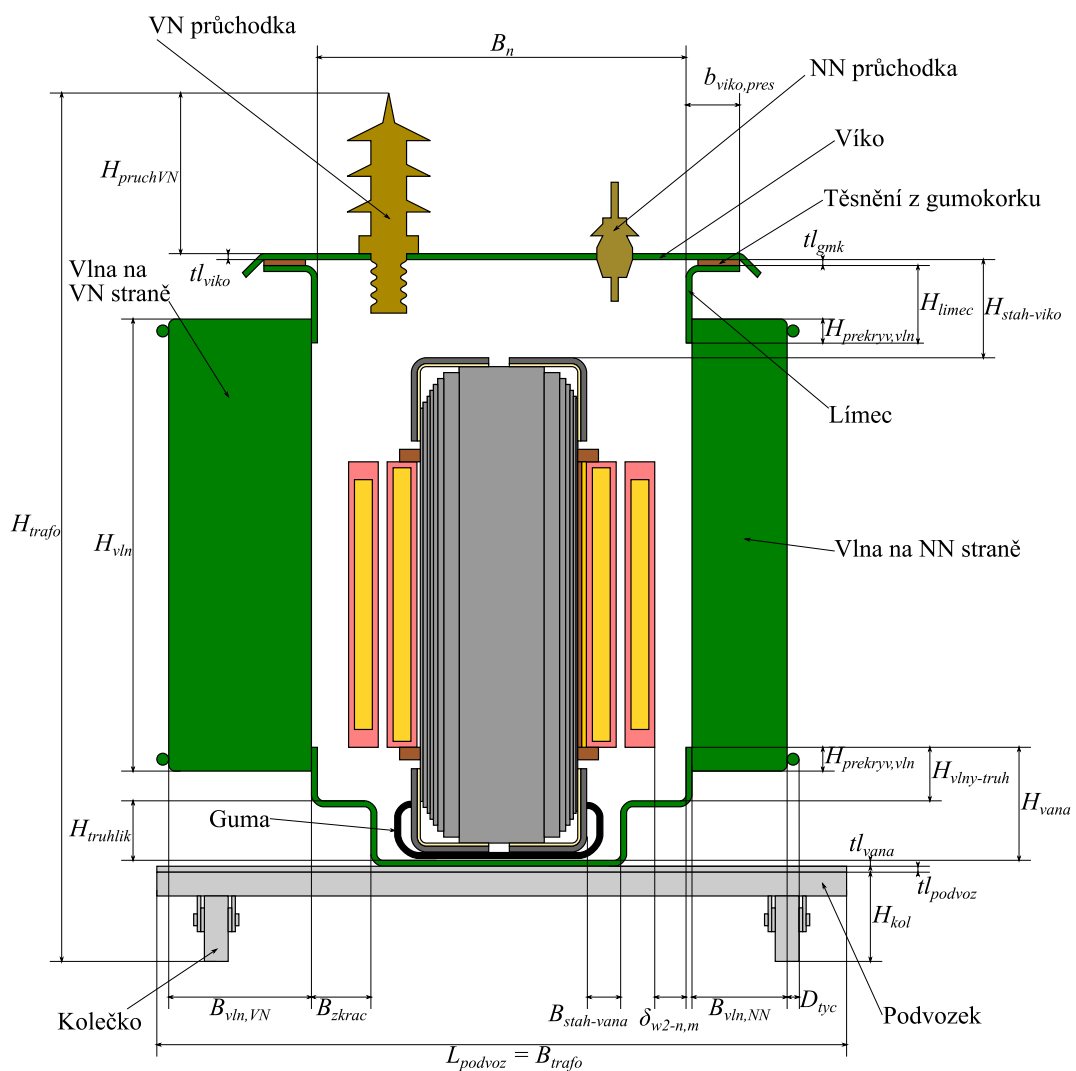
Výsledek se zaokrouhluje směrem dolů na celé milimetry a podobně jako u výšky, i zde se kontroluje, aby hodnota zkrácení nebyla menší než 40 mm, aby měl truhlík význam.

Další fáze výpočtu se zaměří na výpočet hmotnosti celé nádoby a objemu oleje v ní. Nejprve se musí určit počet vln na celé nádobě. Jelikož je stejná rozteč vln t_{vln} na všech stranách, na obou podélných stěnách bude jejich počet stejný $n_{vln,l}$ podle

$$\begin{aligned}
 n_{vln,l} &= \frac{L_n - 2 \cdot t_{ln} - t_{vln,i} - E_{vln,A} - E_{vln,B}}{t_{vln}} + 1 \\
 &= \frac{1009 - 2 \cdot 1,2 - 6 - 30 - 30}{45} + 1 = 21,9 \doteq 21,
 \end{aligned}
 \tag{5.152}$$

kde z výsledku se bere pouze celá část čísla. Šířka plechu vlnovce je pod značením t_{ln} , $E_{vln,A}$ a $E_{vln,B}$ značí minimální vzdálenost vln od krajů. Podobně se vypočítá počet vln na pravé a levé straně $n_{vln,b}$, pro které bude výsledek shodný

$$\begin{aligned}
 n_{vln,b} &= \frac{B_n - 2 \cdot t_{ln} - t_{vln,i} - E_{vln,A} - E_{vln,B}}{t_{vln}} + 1 \\
 &= \frac{528 - 2 \cdot 1,2 - 6 - 30 - 30}{45} + 1 = 11,21 \doteq 11.
 \end{aligned}
 \tag{5.153}$$



Obrázek 5.11 Příčný řez transformátoru s vyznačením rozměrů nádoby a dalšího příslušenství

Víko nádoby má tvar kvádrů, jeho objem vynásobený hustotou plechu nádoby $\rho_{m,Fe,n}$
 $= 7800 \text{ kg/m}^3$ tvoří hmotnost víka G_{viko}

$$\begin{aligned} G_{viko} &= (B_n + b_{viko,pres}) \cdot (L_n + b_{viko,pres}) \cdot tl_{viko} \cdot \rho_{m,Fe,n} \\ &= (528 + 50) \cdot 10^{-3} \cdot (1009 + 50) \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 7800 \\ &= 23,872 \text{ kg}, \end{aligned} \quad (5.154)$$

kde $b_{viko,pres}$ je přesah víka přes hrdlo límce a tl_{viko} je značení tloušťky plechu víka.

Límeček se skládá ze dvou částí, nejprve je zde rám, na který přes těsnění přisedá víko a druhou částí je hrdlo o výšce H_{limec} , které drží horní částí vlnovce. Po vypočítání objemu plechu obou částí V_{ram} a V_{hrdlo} se zjistí jejich společná hmotnost je G_{limec}

$$\begin{aligned} V_{ram} &= ((B_n + b_{viko,pres}) \cdot (L_n + b_{viko,pres}) - B_n \cdot L_n) \cdot tl_{viko} \\ &= ((528 + 50) \cdot (1009 + 50) - 528 \cdot 1009) \cdot 5 \cdot 10^{-9} \\ &= 3,9675 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3, \end{aligned} \quad (5.155)$$

$$\begin{aligned} V_{hrdlo} &= 2 \cdot (B_n + L_n) \cdot H_{limec} \cdot tl_{viko} \\ &= 2 \cdot (528 + 1009) \cdot 65 \cdot 5 \cdot 10^{-9} \\ &= 9,9905 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3, \end{aligned} \quad (5.156)$$

$$\begin{aligned} G_{limec} &= (V_{ram} + V_{hrdlo}) \cdot \rho_{m,Fe,n} = (3,9675 + 9,9905) \cdot 10^{-4} \cdot 7800 \\ &= 10,887 \text{ kg}. \end{aligned} \quad (5.157)$$

Délka plechu vlnovce na jedné stěně se dá zjednodušeně rozdělit na samotnou stěnu nádoby bez uvažování vln, a boční stěny vln, které nejsou při čelním pohledu vidět. Délka plechu vlnovce na všech stranách je celkem L_{vln}

$$\begin{aligned} L_{vln} &= 2 \cdot (B_n + L_n + (n_{vln,l} + 2 \cdot n_{vln,b}) \cdot B_{vln,NN} + n_{vln,l} \cdot B_{vln,VN}) \\ &= 2 \cdot (528 + 1009 + (21 + 2 \cdot 11) \cdot 90 + 21 \cdot 120) = 15,854 \text{ m}. \end{aligned} \quad (5.158)$$

Celková hmotnost vlnovce je pak G_{vln} v následujícím vztahu

$$\begin{aligned} G_{vln} &= L_{vln} \cdot tl_n \cdot H_{vln} \cdot \rho_{m,Fe,n} \\ &= 15,854 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 10^{-3} \cdot 7800 = 148,393 \text{ kg}. \end{aligned} \quad (5.159)$$

kde tl_n je tloušťka vlnovce.

Objem plechu vany se vypočítá jako součin obsahu vnitřního povrchu vany S_{vana} (ve tvaru kvádrů bez horní stěny) a tloušťky plechu vany tl_{vana} . Pokud má vana truhlík, ještě se od plochy kvádrů odečtou plochy vzniklé zkrácením šířky B_{zkrac} o výšce $T_{truhlik}$ na dvou bočních stěnách. S využitím hustoty plechu vany $\rho_{m,Fe,n}$ je pak její hmotnost G_{vana}

$$\begin{aligned} S_{vana} &= B_n \cdot L_n + 2 \cdot L_n \cdot H_{vana} + 2 \\ &\quad \cdot (B_n \cdot H_{vana} - 2 \cdot B_{zkrac} \cdot H_{truhlik}) \\ &= 528 \cdot 1009 + 2 \cdot 1009 \cdot 160 + 2 \cdot (528 \cdot 160 - 2 \cdot 101 \cdot 130) \\ &= 972072 \text{ mm}^2. \end{aligned} \quad (5.160)$$

$$G_{vana} = S_{vana} \cdot tl_{vana} \cdot \rho_{m,Fe,n} = 972072 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 7800 = 37,911 \text{ kg.} \quad (5.161)$$

Celková hmotnost samostatné nádoby G_n je sumou hmotnostní dílčích částí

$$G_n = G_{viko} + G_{limec} + G_{vln} + G_{vana} = 23,872 + 10,887 + 148,393 + 37,911 = 221,063 \text{ kg.} \quad (5.162)$$

Významnou položkou v nákladech na transformátoru tvoří transformátorový olej. Jeho objem se dá vypočítat z objemu vnitřních rozměrů nádoby a objemu, kterým olej vyplní vlny. Naopak se musí odečíst objem, o který je vana zúžena. Podobně se odečte objem, který zaplňuje jádro a vinutí, respektive především vodiče, protože izolace v určité míře olej nasaje a její objem je spíše zanedbatelný. Dále by se měly odečíst objemy NN vývodů, propojů a stahovací konstrukce.

Vnitřní prostor nádoby bez vln zabírá objem V_n

$$V_n = L_n \cdot B_n \cdot H_n = 1009 \cdot 528 \cdot 1220 \cdot 10^{-9} = 649,957 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3. \quad (5.163)$$

Vlny pak pojmu olej o objemu V_{vln}

$$V_{vln} = \left((n_{vln,l} + 2 \cdot n_{vln,b}) \cdot B_{vln,NN} + n_{vln,l} \cdot B_{vln,VN} \right) \cdot tl_{vln} \cdot H_{vln} = \left((21 + 2 \cdot 11) \cdot 90 + 21 \cdot 120 \right) \cdot 6,5 \cdot 1000 \cdot 10^{-9} = 41,535 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3. \quad (5.164)$$

Objem, který je potřeba odečíst kvůli zúžení vany je $V_{truhlik}$

$$V_{truhlik} = 2 \cdot B_{zkrac} \cdot H_{truhlik} \cdot L_n = 2 \cdot 101 \cdot 130 \cdot 1009 \cdot 10^{-9} = 26,496 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3. \quad (5.165)$$

Objem obou vinutí V_w se vypočítá z jejich hmotností G_{w1} , G_{w2} a hustoty hliníku $\rho_{m,Al}$

$$V_w = \frac{G_{w1} + G_{w2}}{\rho_{m,Al}} = \frac{139,838 + 193,075}{2700} = 123,301 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3. \quad (5.166)$$

NN vývody a propoje tvoří objem $V_{vyv,pr}$

$$V_{vyv,pr} = (6 \cdot L_{vyv} + L_{N,pr}) \cdot b_{vyv} \cdot tl_{vyv} + 3 \cdot L_{f,pr} \cdot S_{f,pr} = (6 \cdot 907 + 684) \cdot 60 \cdot 8 \cdot 10^{-9} + 3 \cdot 280 \cdot 300 \cdot 10^{-9} = 2,942 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3. \quad (5.167)$$

Do nádoby bude třeba nalít olej přibližně o objemu V_{olej}

$$V_{olej} = V_n + V_{vln} - V_{truhlik} - V_{Fe} - V_w - V_{vyv,pr} - \frac{G_{stah}}{\rho_{m,Fe,stah}} = (649,957 + 41,535 - 26,496 - 124,366 - 123,301 - 2,942) \cdot 10^{-3} - \frac{38,950}{7800} = 409,393 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3. \quad (5.168)$$

kde G_{stah} je hmotnost stahovací konstrukce a $\rho_{m,Fe,stah}$ je její hustota.

Olej má hustotu $\rho_{m,olej} = 875 \text{ kg/m}^3$, tudíž jeho hmotnost bude G_{olej}

$$G_{olej} = V_{olej} \cdot \rho_{m,olej} = 409,393 \cdot 10^{-3} \cdot 875 = 358,219 \text{ kg.} \quad (5.169)$$

Se známými rozměry nádoby už není problém stanovit celkové rozměry transformátoru. Výška transformátoru H_{trafo} se vypočítá jako součet výšky VN průchodek $H_{pruchVN}$, které jsou na víku nejvyšším komponentem, tloušťkou plechu víka tl_{viko} a tl_{vana} vany, dále vnitřní výškou nádoby H_n , a nakonec ještě tloušťka podvozku $tl_{podvoz} = 7,5 \text{ mm}$ s výškou koleček včetně jejich nosníku $H_{kol} = 158 \text{ mm}$.

$$\begin{aligned} H_{trafo} &= H_{pruchVN} + tl_{viko} + H_n + tl_{vana} + tl_{podvoz} + H_{kol} \\ &= 380 + 5 + 1220 + 5 + 7,5 + 158 = 1775,5 \text{ mm.} \end{aligned} \quad (5.170)$$

Délka transformátoru L_{trafo} je součtem šířky vln $B_{vln,NN}$ na bočních stranách, vnitřní délky nádoby L_n , tloušťky plechu vlnovce tl_n na obou stranách a ještě tyče, která zpevňuje vlny, s průměrem D_{tyc}

$$\begin{aligned} L_{trafo} &= L_n + 2 \cdot B_{vln,NN} + 2 \cdot tl_n + 2 \cdot D_{tyc} \\ &= 1009 + 2 \cdot 90 + 2 \cdot 1,2 + 2 \cdot 8 = 1207,4 \text{ mm.} \end{aligned} \quad (5.171)$$

Podobným způsobem se vypočítá i šířka transformátoru B_{trafo} , jen se nesmí zapomenout na širší vlny $B_{vln,NN}$ na VN straně nádoby. Háček je v tom, že transformátor může být širší než je vnější šířka nádoby $B_{n,i}$ a to díky šířce podvozku, která je $B_{podvoz} = 820 \text{ mm}$

$$\begin{aligned} B_{n,i} &= B_n + B_{vln,NN} + B_{vln,VN} + 2 \cdot tl_n + 2 \cdot D_{tyc} \\ &= 528 + 90 + 120 + 2 \cdot 1,2 + 2 \cdot 8 = 768,4 \text{ mm.} \end{aligned} \quad (5.172)$$

V tomto případě je podvozek širší než vnější šířka nádoby, konečná šířka transformátoru tedy je

$$B_{trafo} = B_{podvoz} = 820 \text{ mm.} \quad (5.173)$$

5.11 Oteplení

První částí kapitoly je výpočet oteplení oleje v nádobě. To je závislé především na chladičí ploše nádoby a velikosti celkových ztrát, které v transformátoru vznikají. Chladičí plochy jsou dvojího typu - vyzařovací (pohledová) plocha $S_{n,p}$, u které se uvažují jen svislé stěny vnitřního obvodu vlnovce a vnější stěny krajních vln. Druhým typem je sdílená plocha $S_{n,sd}$ svislých stěn nádoby, včetně stěn vany a límce, kde dochází k přenosu tepla především prouděním. Tyto plochy $S_{n,p}$ a $S_{n,sd}$ se z parametrů nádoby vypočítají následovně

$$\begin{aligned} S_{n,p} &= 2 \cdot (L_n + B_n + 3 \cdot B_{vln,NN} + B_{vln,VN}) \cdot H_{vln} \\ &= 2 \cdot (1009 + 528 + 3 \cdot 90 + 120) \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 10^{-3} \\ &= 3,854 \text{ m}^2. \end{aligned} \quad (5.174)$$

$$\begin{aligned} S_{n,sd} &= 2 \cdot (L_n + B_n) \cdot H_n \\ &\quad + 2 \cdot \left((n_{vln,l} + 2 \cdot n_{vln,b}) \cdot B_{vln,NN} + n_{vln,l} \cdot B_{vln,VN} \right) \cdot H_{vln} \\ &= 2 \cdot (1009 + 528) \cdot 10^{-3} \cdot 1220 \cdot 10^{-3} \\ &\quad + 2 \cdot \left((21 + 2 \cdot 11) \cdot 90 + 21 \cdot 120 \right) \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 10^{-3} \\ &= 16,530 \text{ m}^2. \end{aligned} \quad (5.175)$$

Z poměru těchto ploch se dá určit součinitel přestupu tepla $\alpha_{\vartheta,n}$ z nádoby do okolního vzduchu podle empirického vztahu z [26]

$$\alpha_{\vartheta,n} = 7 + \frac{6}{\frac{S_{n,sd}}{S_{n,p}}} = 7 + \frac{6}{\frac{16,530}{3,854}} = 8,399 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}. \quad (5.176)$$

Dále se v přenosu tepla uplatní tepelný odpor stěn nádoby $R_{\vartheta,n}$ včetně vln o sdílené ploše $S_{n,sd}$, pro který platí ekvivalentní vztah jako pro odpor elektrický (5.28)

$$R_{\vartheta,n} = \frac{1}{\lambda_{Fe}} \cdot \frac{t l_n}{S_{n,sd}} = \frac{1}{80} \cdot \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{16,530} = 907,441 \cdot 10^{-9} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}, \quad (5.177)$$

kde $\lambda_{Fe} = 80 \text{ K} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{W}^{-1}$ je teplotní vodivost plechu nádoby.

Tepelné zatížení q_n povrchu nádoby je poměr celkových ztrát v transformátoru (nakrátko P_k a naprázdno P_o) a součtu vyzařovací $S_{n,p}$ i sdílené plochy $S_{n,sd}$ stěn nádoby

$$q_n = \frac{P_k + P_o}{S_{n,p} + S_{n,sd}} = \frac{5782,538 + 539,835}{3,854 + 16,530} = 295,446 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}, \quad (5.178)$$

Tepelný spád na stěně nádoby $\Delta\vartheta_n$ je pak součinem tepelného odporu stěn nádoby $R_{\vartheta,n}$ a tepelného zatížení q_n na ní

$$\Delta\vartheta_n = R_{\vartheta,n} \cdot q_n = 907,441 \cdot 10^{-9} \cdot 295,446 = 2,681 \cdot 10^{-4} \text{ K}. \quad (5.179)$$

Celkové ztráty podělené součinitelem přestupu tepla $\alpha_{\vartheta,n}$ a sdílené plochy nádoby $S_{n,sd}$ vedou k získání středního oteplení vzhledem k okolnímu vzduchu $\Delta\vartheta_{n-0,str}$

$$\Delta\vartheta_{n-0,str} = \frac{P_k + P_o}{\alpha_{\vartheta,n} \cdot S_{n,sd}} = \frac{5782,538 + 539,835}{8,399 \cdot 16,530} = 45,539 \text{ K}. \quad (5.180)$$

Přičtením tepelného spádu na stěně nádoby $\Delta\vartheta_n$ ke střednímu oteplení nádoby na vzduch $\Delta\vartheta_{n-0,str}$ se získá střední oteplení oleje na okolní vzduch $\Delta\vartheta_{olej-0,str}$, jelikož je však

tepelný přírůstek na stěně nádoby $\Delta\vartheta_n$ zanedbatelný, je střední oteplení oleje $\Delta\vartheta_{olej-0,str}$ stejné jako oteplení nádoby $\Delta\vartheta_{n-0,str}$

$$\Delta\vartheta_{olej-0,str} = \Delta\vartheta_{n-0,str} = 45,539 \text{ K.} \quad (5.181)$$

Oteplení oleje v horní vrstvě $\Delta\vartheta_{olej-0,h}$ je potom přibližně 1,25násobek střední hodnoty oteplení $\Delta\vartheta_{olej-0,str}$

$$\Delta\vartheta_{olej-0,h} = 1,25 \cdot \Delta\vartheta_{olej-0,str} = 1,25 \cdot 45,539 = 56,924 \text{ K.} \quad (5.182)$$

Oteplení oleje v horní vrstvě je potřeba zkontrolovat, aby nepřesáhlo maximální dovolenou hodnotu 60 K podle normy ČSN EN 60076-2 [27]. Návrh tento požadavek splňuje s rezervou 3,076 K do maximální hodnoty.

Ve druhé části kapitoly se řeší oteplení samotných vinutí. Nejprve se musí určit koeficient zakrytí svislých chladicích ploch mezi jádrem a vnitřní plochou NN vinutí $k_{z,j-w1}$, dále mezi plochami NN a VN vinutí $k_{z,w1-w2}$ a ještě koeficient zakrytí vnější plochy vinutí VN $k_{z,w2}$. Koeficient zakrytí udává poměr chladicí plochy, která se nepodílí na výměně tepla s proudícím olejem. První zmíněný koeficient má hodnotu přibližně $k_{z,j-w1} = 0,1$ a poslední $k_{z,w2} = 0,08$. Koeficient zakrytí mezi NN a VN vinutím $k_{z,w1-w2}$ se dá vypočítat z plochy, kterou v průřezu hlavního chladicího kanálu zabírá žebříček jehož příčky mají v průřezu tvar čtverce, takže jsou stejně široké jako tlusté ($= b_{kanal}$), a jejich vzájemná rozteč je $t_{kanal} = 25$ mm. Výsledný koeficient zakrytí $k_{z,w1-w2}$ je pak

$$k_{z,w1-w2} = \frac{b_{kanal}}{t_{kanal}} = \frac{6}{25} = 0,24. \quad (5.183)$$

Aktivní vnitřní $S_{\vartheta,w1,i}$ a vnější $S_{\vartheta,w1,e}$ chladicí svislé plochy pro všechny tři fáze jsou podle vztahů

$$\begin{aligned} S_{\vartheta,w1,i} &= m \cdot (\pi \cdot D_{w1,i,m} + 2 \cdot L_r) \cdot H_{w1,e} \cdot (1 - k_{z,j-w1}) \\ &= 3 \cdot (\pi \cdot 142 + 2 \cdot 143) \cdot 10^{-3} \cdot 750 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0,1) \\ &= 1,483 \text{ m}^2, \end{aligned} \quad (5.184)$$

$$\begin{aligned} S_{\vartheta,w1,e} &= m \cdot (\pi \cdot D_{w1,e,m} + 2 \cdot L_r) \cdot H_{w1,e} \cdot (1 - k_{z,w1-w2}) \\ &= 3 \cdot (\pi \cdot 209,5 + 2 \cdot 143) \cdot 10^{-3} \cdot 750 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0,24) \\ &= 1,615 \text{ m}^2, \end{aligned} \quad (5.185)$$

kde $D_{w1,i,m}$ a $D_{w1,e,m}$ jsou vnitřní a vnější mechanický průměr vinutí, L_r je délka rovné části a $H_{w1,e}$ je elektrická výška vinutí, protože se uvažuje pouze přechod tepla v radiálním směru z vinutí do oleje.

Tepelné zatížení celkové chladicí plochy vinutí NN je q_{w1}

$$\begin{aligned} q_{w1} &= \frac{P_{ohm1,75} + P_{e,ax,1} + P_{e,r,1}}{S_{\vartheta,w1,i} + S_{\vartheta,w1,e}} = \frac{2201,308 + 7,132 + 330,196}{1,483 + 1,615} \\ &= 819,444 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}, \end{aligned} \quad (5.186)$$

kde je zapotřebí zahrnout jak ohmické ztráty v samotném vinutí $P_{ohm1,75}$, tak i jeho přídavné ztráty $P_{e,ax,1}$ a $P_{e,r,1}$.

Hodnota oteplení povrchu vinutí oproti oleji $\Delta\vartheta_{w1-olej,p}$ je podílem tepelného zatížení q_{w1} a součinitele přestupu tepla z vinutí do oleje $\alpha_{\vartheta,w} = 105,169 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, který je určený

empiricky a vybraný z tabulky [26] podle středního oteplení oleje. Oteplení povrchu vinutí $\Delta\vartheta_{w1-olej,p}$ pak je

$$\Delta\vartheta_{w1-olej,p} = \frac{q_{w1}}{\alpha_{\vartheta,w}} = \frac{819,444}{105,169} = 7,792 \text{ K.} \quad (5.187)$$

Ve vinutí ale ještě vzniká tepelný spád od středu ke svému vnitřnímu povrchu $\Delta\vartheta_{w1-i}$, ale i vnějšímu povrchu $\Delta\vartheta_{w1-e}$. Tepelný odpor je přibližně způsobený třetinou všech ovínů mezizávitové izolace b_{i1} a celou izolací na vnitřním $b_{i1,i}$, respektive na vnějším povrchu $b_{i1,e}$ vinutí NN. Pro výpočet tepelného spádu $\Delta\vartheta_{w1-i}$ platí následující vztah

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{w1-i} &= \frac{q_{w1}}{\lambda_i} \cdot \left(b_{i1,i} + \frac{N_{z1,n} - 1}{3} \cdot b_{i1} \right) \\ &= \frac{819,444}{0,2} \cdot \left(1 + \frac{25 - 1}{3} \cdot 0,15 \right) \cdot 10^{-3} = 9,014 \text{ K,} \end{aligned} \quad (5.188)$$

kde $\lambda_i = 0,2 \text{ K}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{W}^{-1}$ je tepelná vodivost izolačního papíru a $N_{z1,n}$ je jmenovitý počet závitů vinutí NN. Stejným způsobem se vypočítá i tepelný spád od středu vinutí ke svému vnějšímu povrchu $\Delta\vartheta_{w1-e}$

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{w1-e} &= \frac{q_{w1}}{\lambda_i} \cdot \left(b_{i1,e} + \frac{N_{z1,n} - 1}{3} \cdot b_{i1} \right) \\ &= \frac{819,444}{0,2} \cdot \left(1,5 + \frac{25 - 1}{3} \cdot 0,15 \right) \cdot 10^{-3} = 11,062 \text{ K.} \end{aligned} \quad (5.189)$$

Průměrná hodnota tepelného spádu vinutí na svůj svislý povrch je $\Delta\vartheta_{w1-p}$

$$\Delta\vartheta_{w1-p} = \frac{\Delta\vartheta_{w1-i} + \Delta\vartheta_{w1-e}}{2} = \frac{9,014 + 11,062}{2} = 10,038 \text{ K.} \quad (5.190)$$

Sečtením tepelného spádu uvnitř vinutí NN $\Delta\vartheta_{w1-p}$, oteplení povrchu vinutí oproti oleji $\Delta\vartheta_{w1-olej,p}$ a středního oteplení oleje na vzduch $\Delta\vartheta_{olej-0,str}$ je výsledek střední oteplení vinutí oproti okolnímu vzduchu $\Delta\vartheta_{w1-0,str}$

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{w1-0,str} &= \Delta\vartheta_{w1-p} + \Delta\vartheta_{w1-olej,p} + \Delta\vartheta_{olej-0,str} \\ &= 10,038 + 7,792 + 45,539 = 63,369 \text{ K.} \end{aligned} \quad (5.191)$$

A pokud se v předešlém vztahu (5.191) nahradí střední oteplení oleje $\Delta\vartheta_{olej-0,str}$ za oteplení oleje v horní vrstvě $\Delta\vartheta_{olej-0,h}$, získá se i oteplení vinutí NN v horní vrstvě oproti vnějšímu vzduchu $\Delta\vartheta_{w1-0,h}$

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{w1-0,h} &= \Delta\vartheta_{w1-p} + \Delta\vartheta_{w1-olej,p} + \Delta\vartheta_{olej-0,h} \\ &= 10,038 + 7,792 + 56,924 = 74,754 \text{ K.} \end{aligned} \quad (5.192)$$

Podle normy [27] nesmí střední oteplení vinutí překročit 65 K a v horní vrstvě 78 K, což obě vypočítané hodnoty splňují.

Stejným postupem jako ve vztazích (5.184) až (5.192) se prověří oteplení VN vinutí

$$\begin{aligned} S_{\vartheta,w2,i} &= m \cdot (\pi \cdot D_{w2,i,m} + 2 \cdot L_r) \cdot H_{w2,e} \cdot (1 - k_{z,w1-w2}) \\ &= 3 \cdot (\pi \cdot 221,5 + 2 \cdot 143) \cdot 10^{-3} \cdot 735 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0,24) \\ &= 1,645 \text{ m}^2, \end{aligned} \quad (5.193)$$

$$\begin{aligned}
S_{\vartheta,w2,e} &= m \cdot (\pi \cdot D_{w2,e,m} + 2 \cdot L_r) \cdot H_{w2,e} \cdot (1 - k_{z,w2}) \\
&= 3 \cdot (\pi \cdot 304,024 + 2 \cdot 143) \cdot 10^{-3} \cdot 735 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0,08) \\
&= 2,518 \text{ m}^2,
\end{aligned} \tag{5.194}$$

zde se nesmí zapomenout, že vnitřní plocha vinutí VN o mechanickém průměru $D_{w2,i,m}$ má koeficient zakrytí stejný jako má vnější plocha vinutí NN $k_{z,w1-w2}$ a dále vnější plocha o mechanickém průměru $D_{w2,e,m}$ VN vinutí má tento koeficient zakrytí $k_{z,w2} = 0,08$.

$$\begin{aligned}
q_{w2} &= \frac{P_{ohm2,75} + P_{e,ax,2} + P_{e,r,2}}{S_{\vartheta,w2,i} + S_{\vartheta,w2,e}} = \frac{2967,798 + 36,684 + 0,316}{1,645 + 2,518} \\
&= 721,787 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2},
\end{aligned} \tag{5.195}$$

$$\Delta\vartheta_{w2-olej,p} = \frac{q_{w2}}{\alpha_{\vartheta,w}} = \frac{721,787}{105,169} = 6,863 \text{ K}. \tag{5.196}$$

Vztahy pro tepelné spády vinutí VN na vnitřní $\Delta\vartheta_{w2-i}$ a vnější povrch $\Delta\vartheta_{w2-e}$ již nepočítají s počtem mezipoloh, ale se skutečnou celkovou tloušťkou mezipolohové izolace $b_{i2,skut}$, úpravou vztahů se tepelné spády vypočítají následovně

$$\begin{aligned}
\Delta\vartheta_{w2-i} &= \frac{q_{w2}}{\lambda_i} \cdot \left(b_{i2,i} + \frac{b_{i2,skut}}{3} \right) \\
&= \frac{721,787}{0,2} \cdot \left(1,5 + \frac{6,042}{3} \right) \cdot 10^{-3} = 12,682 \text{ K},
\end{aligned} \tag{5.197}$$

$$\begin{aligned}
\Delta\vartheta_{w2-e} &= \frac{q_{w2}}{\lambda_i} \cdot \left(b_{i2,e} + \frac{b_{i2,skut}}{3} \right) \\
&= \frac{721,787}{0,2} \cdot \left(0,6 + \frac{6,042}{3} \right) \cdot 10^{-3} = 9,434 \text{ K},
\end{aligned} \tag{5.198}$$

$$\Delta\vartheta_{w2-p} = \frac{\Delta\vartheta_{w2-i} + \Delta\vartheta_{w2-e}}{2} = \frac{12,682 + 9,434}{2} = 11,058 \text{ K}. \tag{5.199}$$

$$\begin{aligned}
\Delta\vartheta_{w2-0,str} &= \Delta\vartheta_{w2-p} + \Delta\vartheta_{w2-olej,p} + \Delta\vartheta_{olej-0,str} \\
&= 11,058 + 6,863 + 45,539 = 63,460 \text{ K}.
\end{aligned} \tag{5.200}$$

$$\begin{aligned}
\Delta\vartheta_{w2-0,h} &= \Delta\vartheta_{w2-p} + \Delta\vartheta_{w2-olej,p} + \Delta\vartheta_{olej-0,h} \\
&= 11,058 + 6,863 + 56,924 = 74,845 \text{ K}.
\end{aligned} \tag{5.201}$$

Výsledné střední oteplení vinutí VN na okolní vzduch $\Delta\vartheta_{w2-0,str}$ je tedy 63,460 K a to je menší než maximálních 65 K a oteplení vinutí v horní vrstvě $\Delta\vartheta_{w2-0,h}$ je 74,845 K a to je také menší hodnota než normou daných 78 K, čili vypočtená oteplení všech částí jsou v povolených mezích, a to platí i pro vypočtené ztráty naprázdno P_o , nakrátko P_k a napětí nakrátko u_k . Tímto návrh celého olejového distribučního transformátoru končí.

6. NÁKLADY NA VÝROBU TRANSFORMÁTORU

V této kapitole se provede vyčíslení nákladů na materiály navrženého transformátoru, ze kterých jsou jednotlivé komponenty vyrobené. Náklady na lidskou práci při obsluze jednotlivých strojů jako jsou vysekávací linka na plechy, navíječek a zalévacího stroje, nebo přímo proces skládání plechů jádra, skládání aktivní části, nebo svařování nádoby apod., v této práci nebudou pro nedostatek zdrojů zahrnuty, stejně tak, jako režijní náklady atd. Náklady na materiál však tvoří cca 80 % výrobní ceny a změna jejich množství nejvíce rozhoduje o výsledné peněžní hodnotě transformátoru. Navíc např. změna parametrů návrhu náklady na lidskou práci aj. citelně neovlivní.

Ceníky pro jednotlivé položky byly poskytnuty firmou Elpro-Energo Transformers s.r.o. Je však důležité zmínit, že především ceny hliníkových vodičů se v čase velmi dynamicky mění s velkým rozptylem a jejich ceny závisí i na dodávaném množství či požadovaném termínu. Navíc většina položek, jak už transformátorové plechy, či fólie a vodiče i izolační materiály jsou dodávány ze zahraničí, a tudíž jejich cena závisí i na aktuálním měnovém kurzu. Pro přepočítání získaných ceníků byl použit doporučený kurz 27 Kč/€.

Ceník pro většinu materiálů je udáván v Kč/kg v případě transformátorových plechů, hliníkové fólie a drátu jako vodiče ve vinutích, NN vývodů, izolační papír v obou vinutích, plech nádoby a olej. U plechů se cena odvíjí od použité kvality oceli a tloušťky. U fólie je cena závislá na tloušťce stejně jako izolační papír, cena drátu pak závisí přímo na jeho zvoleném průměru.

Pro další materiály je cena udávaná v Kč/m, např. žebřík pro tvorbu chladicích kanálů. Zbylé vybavení jako jsou průchodky, podvozek, kolečka, klín u jádra a přepojovač odboček jsou vybírané z řady podle výkonu transformátoru a jejich cena je udávaná za kus.

Získané náklady na kilogram / metr / kus jsou uvedené ve druhém sloupci v tabulkách 6.1 až 6.5, do kterých jsou položky rozdělené podle celku, který tvoří. V tabulkách je také vždy uvedena celková hmotnost / délka / počet kusů dané položky ve třetím sloupci i se svým značením. Poslední sloupec v tabulkách už je finální vyčíslení nákladů za danou položku a byl získán jako součin hodnot ve druhém a třetím sloupci. Ukázkou vyčíslení nákladů položky budiž např. pro magnetický obvod z tabulky 6.1

$$Z_{Fe} = z_{Fe} \cdot G_{Fe} = 50,625 \cdot 951,400 = 48164,63 \text{ Kč}, \quad (6.1)$$

kde z_{Fe} jsou náklady za jednotku hmotnosti materiálu a G_{Fe} je hmotnost celého magnetického obvodu.

Tabulka 6.1 Náklady za díly magnetického obvodu

Položka	Měrné náklady	Hmotnost	Náklady za položku
Magnetický obvod	Z_{Fe}	G_{Fe}	Z_{Fe}
	50,625 Kč/kg	951,400 kg	48164,63 Kč
Stahovací konstrukce	Z_{stah}	G_{stah}	Z_{stah}
	32,317 Kč/kg	38,950 kg	1258,75 Kč

Tabulka 6.2 Náklady za díly ve vinutí NN

Položka	Měrné náklady	Hmotnost / délka	Náklady za položku
Hliníková fólie	Z_{wl}	G_{wl}	Z_{wl}
	78,840 Kč/kg	139,838 kg	11024,83 Kč
Izolační papír	Z_{il}	G_{il}	Z_{il}
	159,03 Kč/kg	16,857 kg	2680,77 Kč
Okrajová izolační páska	$Z_{il,h}$	$G_{il,h}$	$Z_{il,h}$
	193,320 Kč/kg	1,315 kg	256,15 Kč
NN vývody a nulový propoj	$Z_{vyv,Npr}$	$G_{vyv,Npr}$	$Z_{vyv,Npr}$
	94,500 Kč/kg	7,939 kg	750,24 Kč
Propoje mezi vývody a průchodkami	$Z_{f,pr}$	$G_{f,pr}$	$Z_{f,pr}$
	183,600 Kč/kg	2,243 kg	411,81 Kč
Hlavní chladič kanál	Z_{hk}	L_{hk}	Z_{hk}
	501,660 Kč/m	2,889 m	1449,30 Kč

Tabulka 6.3 Náklady za díly ve vinutí VN

Položka	Měrné náklady	Hmotnost	Náklady za položku
Hliníkový vodič	Z_{w2}	G_{w2}	Z_{w2}
	100,980 Kč/kg	193,075 kg	19496,71 Kč
Izolační páska	Z_{i2}	G_{i2}	Z_{i2}
	213,300 Kč/kg	23,825 kg	5081,87 Kč

Tabulka 6.4 Náklady za nádobu a olej

Položka	Měrné náklady	Hmotnost	Náklady za položku
Plech nádoby	Z_n	G_n	Z_n
	95 Kč/kg	221,063 kg	21000,99 Kč
Olej	Z_{olej}	G_{olej}	Z_{olej}
	24,3 Kč/kg	358,219 kg	8704,72 Kč

Tabulka 6.5 Náklady ostatní příslušenství

Položka	Měrné náklady	Počet kusů	Náklady za položku
Podvozek	Z_{podvoz}	n_{podvoz}	Z_{podvoz}
	2678 Kč/kus	1	2678 Kč
Kolečka	Z_{kol}	n_{kol}	Z_{kol}
	214 Kč/kus	4	856 Kč
NN průchodky	$Z_{pruchNN}$	$n_{pruchNN}$	$Z_{pruchNN}$
	1200 Kč/kus	4	4800 Kč
VN průchodky	$Z_{pruchVN}$	$n_{pruchVN}$	$Z_{pruchVN}$
	1500 Kč/kus	3	4500 Kč
Přepojovač odboček	Z_{prepoj}	n_{prepoj}	Z_{prepoj}
	2000 Kč/kus	1	2000 Kč
Klín	Z_{klin}	n_{klin}	Z_{klin}
	202 Kč/kus	1	202 Kč

Sumou nákladů za všechny položky, tedy všech číselných hodnot v posledním sloupci v tabulkách 6.1 až 6.5 se získají náklady za celý navrhovaný transformátor Z_{trafo}

$$\begin{aligned} Z_{trafo} &= Z_{Fe} + Z_{stah} + \dots + Z_{prepoj} + Z_{klin} \\ &= 48164,63 + 1258,75 + \dots + 2000 + 202 = 135316,77 \text{ Kč.} \end{aligned} \quad (6.2)$$

Výsledná hodnota materiálu použitého na výrobu navrhovaného transformátoru dosahuje přes 135 tisíc korun českých.

Ještě se nabízí vypočítat celkovou hmotnost transformátoru G_{trafo} a to sečtením všech vypsanych hmotností v tabulkách 6.1 až 6.4 a souhrnné hmotnosti všech položek z tabulky 6.5 $G_{ostat} = 78,8 \text{ kg}$

$$\begin{aligned} G_{trafo} &= G_{Fe} + G_{stah} + \dots + G_{olej} + G_{ostat} \\ &= 951,400 + 38,950 + \dots + 358,219 + 78,8 = 2033,524 \text{ kg.} \end{aligned} \quad (6.3)$$

Konečná hmotnost transformátoru lehce překročí 2 tuny.

7. ZÁVĚR

V této práci byl proveden popis postupu výroby olejových distribučních transformátorů od vysekávání a skládání jádra, přes proces navíjení NN i VN vinutí až po výrobu nádoby s olejem a sestavení všech částí do jednoho celku tvořící výsledný transformátor. Následně práce obsahuje návrh a výpočet takového transformátoru zohledňující zmíněné výrobní technologie s využitím optimalizačního programu firmy Elpro-Energo Transformers s.r.o. pro nalezení parametrů stroje, které se volí, aby výrobní náklady na transformátor požadovaných vlastností byly co nejmenší. Výpočet výrobních nákladů je také bodem zadání této práce.

Návrh transformátoru byl proveden pro zadaný jmenovitý výkon 630 kVA s jmenovitým převodem 22/0,4 kV. Výsledný transformátor dále musel splňovat požadavek EU na tzv. EcoDesign první fáze, ve které musí být výsledné jmenovité ztráty transformátoru naprázdno menší než 600 W a jmenovité ztráty nakrátko menší než 6500 W s nulovou tolerancí, tudíž je vhodné, aby měl návrh aspoň 10 % rezervu. Transformátor musel být také v souladu s dalšími výstupními parametry definované normami, které jsou uvedené v tabulce 5.1. Mezi nejdůležitější patří jmenovité napětí nakrátko, které musí být mezi 3,6 % a 4,4 %, oteplení oleje v horní vrstvě pod 60 K, střední oteplení vinutí pod 65 K a v horní vrstvě 78 K.

Navržený transformátor všechny výše uvedené požadavky splňuje, konkrétně vypočítané ztráty naprázdno s hodnotou 539,835 W a ztráty nakrátko 5782,538 W, obojí s rezervou lehce překračující 10 %. Napětí nakrátko bylo spočítáno s výsledkem 4,073 %, tedy velmi blízko středu povoleného intervalu. Při jmenovitém zatížení by se měl olej v horní vrstvě nádoby transformátoru zahřát maximálně o 56,9 K oproti okolí. Pro vinutí NN bylo střední oteplení určeno na 63,4 K a v jeho horní vrstvě 74,8 K. S podobným výsledkem vyšlo i VN vinutí, tedy se středním oteplením 63,5 K a v horní vrstvě 74,8 K.

Transformátor s takovými vlastnostmi bude mít vnější rozměry 1207,4 mm na délku, 820 mm do šířky a 1775,5 mm na výšku, včetně průchodek a podvozku s kolečky. Hmotnost navrženého transformátoru by se měla pohybovat kolem 2,03 t a výrobní náklady za materiál byly naceněny na 135 317 Kč. Ceník za lidskou práci při výrobě pro tuto práci nebyly poskytnuty, pro daný výkon se však změnou vstupních parametrů citelně neliší.

Jelikož 1. července 2021 nabyde účinnosti druhá fáze EcoDesignu, pro výkon 630 kVA budou povolené ztráty nakrátko sníženy na 540 W a ztráty nakrátko na 4600 kW. Při uvažování 10% rezervy u těchto ztrát a při zachování ostatních požadavků by stejným postupem vyšel transformátor s nejnižšími výrobními náklady přibližně 204 100 Kč a s hmotností skoro 3 t. Pro představu obojí tedy narostlo přibližně o 50 %. Rozměry takto navrženého transformátoru jsou 1354 mm na délku, 820 mm na šířku a 1896 mm na výšku. Na délku transformátor naroste o 12 % a do výšky o 6 %, šířka je dána podvozkem. Zajímavost je, že s těmito ztrátami je oteplení vinutí velmi nízko pod dov. hodnotou.

LITERATURA

- [1] Transformační a spínací stanice, vedení nízkého napětí (NN). *E-ON Distribuce* [online]. Brno [cit. 2020-10-11]. Dostupné z: <https://www.eon-distribuce.cz/clanek/prenosova-distribucni-soustava-5-cast>
- [2] Nařízení Komise (EU). In: *Úřední věstník Evropské unie*. Brusel: Evropská komise, 2014, ročník 2014, číslo 548. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0548&from=EN>
- [3] Distribution Oil Transformer: Oil Immersed up to 6 MVA. *Alfanar* [online]. Saudská Arábie [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: https://www.alfanar.com/catalogs/transformers/Distribution_oil_transformer.pdf
- [4] Olejové transformátory. *Elpro-Energo s.r.o.* [online]. Praha, 2020 [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: <https://www.elpro-energo.cz/olejove-transformatory/olejove-transformatory-sgb-neumark/>
- [5] KULKARNI, S.V. a S.A. KHAPARDE. *Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics*. 2nd Edition. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2013, 750 s. ISBN 978-1-4398-5418-1.
- [6] Grain Oriented Silicon Steel for Compressors - CRGO - Cold Rolled Grain Oriented Steel. *Shanghai Metal* [online]. Šanghaj, Čína, 2020 [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: https://www.shanghaimetal.com/grain_oriented_silicon_steel_for_compressors-2613.htm
- [7] HEATCOTE, Martin J. *The J&P Transformer Book*. 13th Edition. UK: Elsevier, 2007, 989 s. ISBN 978-0-7506-8164-3.
- [8] Three Phase Transformers. *Electronics Tutorials* [online]. [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/transformer/three-phase-transformer.html>
- [9] The Differences between Square, Oblong and Circular Transformer Cores. *Teck Global* [online]. Perth, Austrálie, 2017 [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: <https://teckglobal.com.au/news/41-differences-square-oblong-circular-transformer-core>
- [10] Oval Core and Coil Geometry for Oil Cooled Distribution Transformers. *SGB-SMIT Group* [online]. Německo, 2016 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://www.sgb-smit.com/epower/latest-issue/epower-issue-032012/epower-detailansicht/article/oval-core-and-coil-geometry-for-oil-cooled-distribution-transformers/>
- [11] JEZERSKI, Eugenius. *Transformátory: teoretické základy*. 1. vyd. Praha: Academia, 1973.
- [12] QUREISHI, Said. *Reducing Building Factor by Using Step Lap (SL) Laminations* [online]. In: . Indie: KRYFS Power Components, s. 11 [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: https://nanopdf.com/download/reducing-building-factor-by-using-step-lap-sl-laminations_pdf

- [13] PHOPHONGVIWAT, Teeraphon. *Investigation of the Influence of Magnetostriction and Magnetic Forces on Transformer Core Noise and Vibration*. Cardiff, Spojené království, 2013. Dizertační práce. Cardiff School of Engineering, Cardiff University.
- [14] TBA Cutting Lines for Transformer Core Laminations: Georg Precisioncut TBA. *Heinrich Georg GmbH* [online]. Německo, 2020 [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: <https://www.georg.com/en/products/tba-cutting-lines-for-transformer-core-laminations/>
- [15] 45' StepLap Cutting Line. *Sumwic* [online]. Taiwan [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: <http://sumwic.tw/product/index/79>
- [16] *TMC Transformers* [online]. Itálie [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <http://www.tmctransformers.com/>
- [17] LV Foil Winding Machines. *Tuboly-Astronic AG* [online]. Švýcarsko, 2018 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <https://www.tuboly-astronic.ch/products/coil-winding/lv-foil-winding-machines/>
- [18] Distribution Transformers. *Industrial-Electronics* [online]. [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: https://www.industrial-electronics.com/transformers_7h.html
- [19] Tiger VPS 3. *BR Technologies* [online]. Německo [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://en.br-tech.de/tiger>
- [20] Krempel Electrical Insulation Materials for Oil Transformers. *Krempel* [online]. Německo [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://www.krempel-group.com/en/solutions/electrical-insulation/electrical-insulation-for-oil-transformers/>
- [21] Corrugated Transformer Tank. *Micro-Mech Engineers* [online]. Indie [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://micromech.co.in/products/corrugated-transformer-tank/>
- [22] Transformer Tank / CAP. *Trans-El* [online]. Turecko [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://www.trans-el.com/en/production/transformer-tank-cap-10.html>
- [23] Sušení nízkou frekvencí. *Revos* [online]. ČR [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <http://www.revos.cz/sluzby-pro-energetiku/suseni-nizkou-frekvenci>
- [24] Elektroizolační oleje. *MM spektrum* [online]. 2015, **2015**(9), 112 [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/elektroizolacni-oleje.html>
- [25] *ČSN EN 50588-1, Střední výkonové transformátory 50 Hz s nejvyšším napětím pro zařízení nepřevyšujícím 36 kV - Část 1: Obecné požadavky*. Ed. 2. Praha: Český normalizační institut, 2018. ČSN EN 50588-1 ed. 2.
- [26] STUHL, Pavel, Jan ŠLOSÁREK a Miroslav MRAJCA. *Návrh olejového transformátoru*. Třinec, 2020.
- [27] *ČSN EN 60076-2, Výkonové transformátory - Část 2: Oteplení transformátorů ponořených do kapaliny*. Ed. 2. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [28] KÜCHLER, Rudolf. *Die Transformatoren: Grundlagen für ihre Berechnung und Konstruktion*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 1966. ISBN 978-3-642-52497-4.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

AG	akciová společnost (Aktiengesellschaft)
Co. KG	komanditní společnost (Compagnie Kommanditgesellschaft)
CRGO	za studena válcované orientované plechy (cold-rolled grain-oriented)
EU	Evropská unie
GmbH	společnost s ručením omezeným (Gesellschaft mit beschränkter Haftung)
Hi-B	za studena válcované orientované plechy s vysokou permeabilitou (high permeability cold-rolled)
HRGO	za tepla válcované orientované plechy (hot-rolled grain-oriented)
NN	nízké napětí
s.r.o.	společnost s ručeným omezením
VN	vysoké napětí

Symboly:

AC_{NN}	střídavé výdržné zkušební napětí na straně NN	[kV]
AC_{VN}	střídavé výdržné zkušební napětí na straně VN	[kV]
B	magnetická indukce obecně	[T]
B_{ax}	Vrcholová hodnota amplitudy magnetické indukce rozptylového toku v axiálním směru	[T]
b_{i1}	tloušťka izolačního papíru v NN vinutí	[mm]
$b_{i1,e}$	tloušťka izolace na vnějším průměru vinutí NN	[mm]
$b_{i1,i}$	tloušťka izolace na vnitřním průměru vinutí NN	[mm]
$b_{i2,AC,j}$	potřebná tloušťka izolace pro střídavé namáhání VN vinutí v j-té poloze	[mm]
$b_{i2,e}$	tloušťka izolace na vnějším průměru vinutí VN	[mm]
$b_{i2,i}$	tloušťka izolace na vnitřním průměru vinutí VN	[mm]
$b_{i2,LI,A,j}$	potřebná tloušťka izolace pro rázové namáhání od začátku VN vinutí v j-té poloze	[mm]
$b_{i2,LI,B,j}$	potřebná tloušťka izolace pro rázové namáhání od konce VN vinutí v j-té poloze	[mm]
$b_{i2,max,j}$	výsledná doporučená tloušťka izolace VN vinutí v j-té poloze	[mm]
$b_{i2,max,op,j}$	vyrobitelná výška vrcholu klínu progresivní mezipolohové izolace VN vinutí v j-té poloze	[mm]
$b_{i2,min}$	tloušťka začátku klínu progresivní mezipolohové izolace VN vinutí	[mm]

$b_{i2,papir}$	celková tloušťka izolačního papíru ve všech mezipolohách	[mm]
$b_{i2,pas,max}$	maximální dosažitelná tloušťka vrcholu klínu progresivní mezipolohové izolace VN vinutí	[mm]
$b_{i2,pas,min}$	minimální dosažitelná tloušťka vrcholu klínu progresivní mezipolohové izolace VN vinutí	[mm]
$b_{i2,pas2}$	tloušťka izolačního papíru pro navíjení progresivní izolace VN vinutí (dvě paralelně)	[mm]
$b_{i2,pas3}$	tloušťka izolačního papíru dodatečné pásky pro navíjení okrajové izolace VN vinutí	[mm]
$b_{i2,skut}$	skutečná mechanická tloušťka izolace ve všech mezipolohách (včetně pryskyřice) VN vinutí	[mm]
$b_{i2,str,j}$	průměrná tloušťka izolačního papíru j-té meziopolohy VN vinutí	[mm]
B_j	magnetická indukce v jádře	[T]
b_{kanal}	šířka hlavního kanálu mezi NN a VN vinutím	[mm]
B_n	vnitřní šířka nádoby	[mm]
$B_{n,i}$	vnější šířka nádoby	[mm]
$B_{o,j}$	šířka okna magnetického obvodu	[mm]
$b_{pl,n}$	šířka n-tého stupně jádra	[mm]
B_{podvoz}	šířka podvozku	[mm]
b_{prys}	tloušťka pryskyřice nanesené na izolačním papíru	[mm]
B_r	Vrcholová hodnota amplitudy magnetické indukce rozptylového toku v radiálním směru	[T]
$b_{stah,mezi}$	mezera mezi L-profilu stahovací konstrukce	[mm]
$B_{stah-vana}$	vzdálenost spodní stahovací konstrukce od vany	[mm]
B_{trafo}	vnější výsledná šířka transformátoru	[mm]
b_{v1}	tloušťka (v řezu šířka) vodivé fólie NN vinutí	[mm]
b_{v2}	šířka zploštěného holého vodiče VN vinutí	[mm]
$b_{v2,i}$	šířka zploštěného vodiče s izolací VN vinutí	[mm]
$b_{viko,pres}$	přesah víka přes hrdlo límce	[mm]
$B_{vln,NN}$	šířka vln na NN straně a bočních stěnách	[mm]
$B_{vln,VN}$	šířka vln na VN straně	[mm]
b_{vyv}	šířka vývodu z NN vinutí	[mm]
$B_{w1,e}$	elektrická (radiální) šířka vinutí NN	[mm]
$B_{w1,m}$	mechanická (radiální) šířka vinutí NN	[mm]
$B_{w2,e}$	elektrická (radiální) šířka vinutí VN	[mm]
$B_{w2,m}$	mechanická (radiální) šířka vinutí VN	[mm]
B_{zkrac}	šířka zkrácení na jedné straně vany pro vytvoření truhlíku	[mm]

D_j	průměr půlkruhové části jádra	[mm]
D_{tyc}	průměr tyče na zpevnění vln	[mm]
dv	element celkového objemu cívky	[m ³]
d_{v2}	průměr holého vodiče VN vinutí	[mm]
$d_{v2,i}$	průměr vodiče s izolací VN vinutí	[mm]
$D_{w1,e,e}$	elektrický vnější průměr NN vinutí	[mm]
$D_{w1,e,m}$	mechanický vnější průměr NN vinutí	[mm]
$D_{w1,i,e}$	elektrický vnitřní průměr NN vinutí	[mm]
$D_{w1,i,m}$	mechanický vnitřní průměr NN vinutí	[mm]
$D_{w2,e,e}$	elektrický vnější průměr VN vinutí	[mm]
$D_{w2,e,m}$	mechanický vnější průměr VN vinutí	[mm]
$D_{w2,i,e}$	elektrický vnitřní průměr VN vinutí	[mm]
$D_{w2,i,m}$	mechanický vnitřní průměr VN vinutí	[mm]
ED	eco design	[-]
$E_{d,LI}$	měrná elektrická pevnost izolační pásky na krátkodobé působení rázové vlny	[kV/mm]
$E_{d,Un}$	měrná elektrická pevnost izolační pásky pro jmenovité namáhání	[kV/mm]
$E_{vln,A}$	minimální vzdálenost krajní vlny od hrany nádoby zleva	[mm]
	minimální vzdálenost krajní vlny od hrany nádoby	[mm]
$E_{vln,B}$	zprava	
f_n	jmenovitá frekvence	[Hz]
$G_{f,pr}$	celková hmotnost fázových NN propojů	[kg]
G_{Fe}	hmotnost celého magnetického obvodu	[kg]
G_{i1}	celková hmotnost izolačního papíru v NN vinutích	[kg]
$G_{i1,h}$	celková hmotnost okrajové pásky v NN vinutích	[kg]
G_{i2}	Celková hmotnost izolační pásky ve VN vinutích	[kg]
$G_{i2,e}$	celková hmotnost izolace na vnějších průměrech VN vinutí	[kg]
$G_{i2,m}$	celková hmotnost mezipolohové i okrajové izolace ve VN vinutích	[kg]
G_{limec}	hmotnost plechu límce	[kg]
G_n	celková hmotnost samostatné nádoby	[kg]
G_{NN}	skupina zapojení na straně NN	[-]
G_{ostat}	suma hmotností podvozku, koleček, průchodek, přepojovače odboček a klínů	[kg]
G_{stah}	celková hmotnost stahovací konstrukce	[kg]
G_{trafo}	celková hmotnost transformátoru	[kg]
G_{vana}	hmotnost vany	[kg]
G_{viko}	hmotnost víka nádoby	[kg]

G_{vln}	celková hmotnost vlnovce	[kg]
G_{VN}	skupina zapojení na straně VN	[-]
$G_{vyv,Npr}$	celková hmotnost NN vývodů a nulového propoje	[kg]
G_{w1}	hmotnost vodiče (fólie) v NN vinutí	[kg]
G_{w2}	hmotnost vodiče (fólie) v VN vinutí	[kg]
H	magnetická intenzita	[A/m]
h	okamžitá hodnota magnetické intenzity	[A/m]
HC	hodinové číslo	[-]
h_{i1}	šířka okrajové pásky na okrajích vinutí NN	[mm]
H_{i1}	výška svitku izolačního papíru pro NN vinutí	[mm]
h_{i2}	šířka (v řezu výška) izolační pásky VN vinutí	[mm]
$h_{j-w,m}$	minimální mechanická vzdálenost konců vinutí (od koncové izolace) od jha	[mm]
$h_{j-w1,m}$	mechanická vzdálenost konců NN vinutí (od koncové izolace) od jha	[mm]
$h_{j-w2,m}$	mechanická vzdálenost konců VN vinutí (od koncové izolace) od jha	[mm]
H_{kol}	výška koleček s nosíkem	[mm]
H_{limec}	výška límce (nosný rám)	[mm]
H_{max}	maximální hodnota magnetické intenzity rozptylového pole	[A/m]
H_n	vnitřní výška nádoby	[mm]
$H_{o,j}$	výška okna magnetického obvodu	[mm]
h_{pol}	maximální výška polohy VN vinutí	[mm]
$H_{prekryv_vln}$	překrytí vln přes hrany vany a límce	[mm]
$H_{pruch,VN}$	výška VN průchodek (vyšší než NN)	[mm]
$h_{stah,zkr}$	zkrácení stahovací konstrukce od hrany jha směrem u vinutí	[mm]
$H_{stah-viko}$	prostor mezi horní stahovací konstrukcí a víkem	[mm]
H_{trafo}	vnější výsledná výška transformátoru	[mm]
$H_{truhlik}$	výška zúžené části vany, tzv. truhlíku	[mm]
h_{v1}	šířka (v řezu výška) vodivé fólie NN vinutí	[mm]
h_{v2}	výška zploštěného holého vodiče VN vinutí	[mm]
$h_{v2,i}$	výška zploštěného vodiče s izolací VN vinutí	[mm]
H_{vana}	výška vany	[mm]
H_{vln}	maximální výška vlny	[mm]
$H_{vln-truh}$	vzdálenost ohybu pod vlnami pro zúžení vany	[mm]
$H_{w1,e}$	elektrická (axiální) výška vinutí NN	[mm]
$H_{w1,m}$	mechanická (axiální) výška vinutí NN	[mm]
$H_{w2,e}$	elektrická (axiální) výška vinutí VN	[mm]

$H_{w2,m}$	mechanická (axiální) výška vinutí VN	[mm]
h_{zmen}	posun polohy od okraje při přechodu z jedné polohy do druhé ve VN vinutí	[mm]
I	proud obecně	[A]
i	číslo zapojené odbočky ve VN vinutí	[%]
$I_{n,f1}$	jmenovitý proud ve vinutí NN	[A]
$I_{n,f2}$	jmenovitý proud ve vinutí VN	[A]
i_{v2}	tloušťka izolace vodiče VN vinutí	[mm]
j	číslo polohy / mezipolohy	[mm]
$k_{e,po}$	součinitel přídavných ztrát naprázdno	[-]
$k_{e,r,1}$	součinitel přídavných ztrát ve fóliovém vinutí v radiálním směru	[W/kg]
k_{Fe}	celkový činitel plnění jádra včetně uvažování tvaru	[-]
k_{pl}	činitel plnění plechů v již zaplněné ploše	[-]
k_{rg}	Rogowského činitel	[-]
$k_{U,chyb,i}$	chyba vypočítaného převodu oproti požadovanému pro i -tou odbočku ve VN vinutí	[%]
$K_{U,i}$	napěťový převod pro daný návrh při zapojení i -té odbočky ve VN vinutí	[-]
$K_{U,teor,i}$	požadovaný napěťový převod při zapojení i -té odbočky ve VN vinutí	[-]
k_{Ui}	opravný koeficient pro návrhovou izolační hladinu VN vinutí	[-]
k_{v2}	koeficient zohledňující nepřesnost při navíjení VN vinutí	[-]
$k_{z,j-w1}$	koeficient zakrytí plochy vnitřního průměru NN vinutí	[-]
$k_{z,w1-w2}$	koeficient zakrytí ploch na vnějším průměru NN vinutí a vnitřním průměru VN vinutí	[-]
$k_{z,w2}$	koeficient zakrytí ploch na vnějším průměru VN vinutí	[-]
k_{zv}	zplošťovací koeficient vodiče VN vinutí	[-]
$k_{\theta,Al}$	teplotní koeficient vodivosti hliníku	[°C]
$k_{\theta,Cu}$	teplotní koeficient vodivosti mědi	[°C]
$L_{f,pr}$	délka fázového NN propoje	[mm]
L_{hk}	délka žebříčku tvořící hlavní kanál	[m]
$L_{i1,k}$	délka izolačního papíru kolem hlavního kanálu	[m]
$L_{i1,m}$	délka izolačního papíru mezi závity NN vinutí	[m]
LI_{NN}	impulsní výdržné zkušební napětí na straně NN	[kV]
LI_{VN}	impulsní výdržné zkušební napětí na straně VN	[kV]
L_n	vnitřní délka nádoby	[mm]
$L_{N,pr}$	délka nulového NN propoje	[mm]

L_r	délka rovné části jádra	[mm]
L_r	rozptylová indukčnost	[H]
$L_{r,ax}$	hlavní indukčnost v axiálním směru	[H]
$L_{r,c}$	celková rozptylová indukčnost	[H]
$L_{r,r}$	přídavná rozptylová indukčnost v příčném směru	[H]
l_{rq}	střední délka siločar rozptylového radiálního toku	[mm]
$l_{stah,pres}$	přesah délky stahovací konstrukce přes vnější vinutí VN	[mm]
L_{trafo}	vnější výsledná délka transformátoru	[mm]
L_{vln}	délka plechu vlnovce na všech stranách	[m]
L_{vyv}	délka NN vývodu	[mm]
L_{w1}	celková délka fólie v NN vinutí	[m]
L_{w2}	celková délka fólie v VN vinutí	[m]
m	počet fází	[-]
M_j	rozteč sloupků magnetického obvodu	[mm]
n	číslo stupně	[-]
$N_{i1,k}$	celkový počet ovinů izolačního papíru kolem hlavního kanálu	[-]
n_{klin}	počet klínů	[-]
n_{kol}	počet koleček	[-]
n_{odb}	počet odboček	[-]
n_{podvoz}	počet podvozků	[-]
n_{pol}	počet poloh ve VN vinutí	[-]
$n_{pol,odb}$	poloha VN vinutí, od které začíná odbočková sekce	[-]
n_{prepoj}	počet přepojovačů odboček	[-]
$n_{pruchNN}$	počet NN průchodek	[-]
$n_{pruchVN}$	počet VN průchodek	[-]
n_{stup}	počet stupňů půlkruhové části jádra	[-]
$n_{vln,b}$	počet vln na bočních stěnách nádoby	[-]
$n_{vln,l}$	počet vln na podélných stěnách nádoby	[-]
$N_{z1,n}$	počet závitů NN vinutí	[-]
$N_{z2,c}$	celkový počet závitů VN vinutí	[-]
$N_{z2,i}$	počet aktivních závitů při zapojení i-té odbočky ve VN vinutí	[-]
$N_{z2,n}$	počet závitů na jmenovité odbočce VN vinutí	[-]
$N_{z2,neodb}$	počet závitů v neodbočkové sekci VN vinutí	[-]
$N_{z2,odb}$	počet závitů v odbočkové sekci VN vinutí	[-]
$N_{z2,odb,i}$	závit v odbočkové části VN, ze kterého je vyvedená i-tá odbočka	[-]
$N_{z2,odb,zac}$	počet závitů mezi začátkem navíjení VN vinutí a odbočkové sekce	[-]

$N_{z2,okr,0}$	počet závitů pro vyvedení jmenovité odbočky od okraje VN vinutí	[-]
$N_{z2,pol}$	rovnoměrně rozdělený počet závitů v poloze VN vinutí	[-]
$N_{z2,pol,15}$	počet závitů v poslední (15.) poloze VN vinutí	[-]
$N_{z2,pol,max}$	maximální počet závitů v poloze VN vinutí	[-]
o_{str}	náhradní střední délka obvodu vinutí	[mm]
$p_{e,ax,1}$	měrné přídavné ztráty v axiálním směru v NN vinutí	[W/kg]
$P_{e,ax,1}$	absolutní přídavné ztráty v axiálním směru v NN vinutí	[W]
$p_{e,ax,2}$	měrné přídavné ztráty v axiálním směru ve VN vinutí	[W/kg]
$P_{e,ax,2}$	absolutní přídavné ztráty v axiálním směru ve VN vinutí	[W]
$P_{e,r,1}$	absolutní přídavné ztráty v radiálním směru v NN vinutí	[W]
$p_{e,r,2}$	měrné přídavné ztráty v radiálním směru ve VN vinutí	[W/kg]
$P_{e,r,2}$	absolutní přídavné ztráty v radiálním směru ve VN vinutí	[W]
P_k	celkové ztráty nakrátko	[W]
P_{kn}	jmenovité ztráty nakrátko	[W]
P_o	ztráty naprázdno	[W]
p_o	měrné ztráty v oceli	[W/kg]
$P_{ohm1,20}$	ohmické ztráty v NN vinutí při teplotě 20 °C	[W]
$P_{ohm1,75}$	ohmické ztráty v NN vinutí při referenční teplotě	[W]
$P_{ohm2,20}$	ohmické ztráty v VN vinutí při teplotě 20 °C	[W]
$P_{ohm2,75}$	ohmické ztráty v VN vinutí při referenční teplotě	[W]
P_{on}	jmenovité ztráty naprázdno	[W]
$P_{vyyv,pr}$	celkové ztráty v NN vývodech a propojích	[W]
q_n	tepelné zatížení povrchu nádoby	[W·m ⁻²]
q_{w1}	tepelné zatížení celkové chladicí plochy vinutí NN	[W·m ⁻²]
q_{w2}	tepelné zatížení celkové chladicí plochy vinutí VN	[W·m ⁻²]
R	elektrický odpor obecně	[Ω]
$R_{f,pr}$	odpor fázového NN propoje při teplotě 20 °C	[Ω]
$R_{N,pr}$	odpor nulového NN propoje při teplotě 20 °C	[Ω]
r_{odb}	rozsah odboček	[%]
R_{vyyv}	odpor vývodu při teplotě 20 °C	[Ω]
$R_{w1,20}$	odpor vodiče ve vinutí NN při teplotě 20 °C	[Ω]
$R_{w2,20}$	odpor vodiče ve vinutí VN při teplotě 20 °C	[Ω]
$R_{g,n}$	tepelný odpor stěn nádoby	[W·K ⁻¹]
$S_{f,pr}$	průřez fázového NN propoje	[mm ²]
S_{Fe}	plocha oceli v průřezu jádra	[mm ²]
$S_{i2,m}$	plocha mezipolohové i okrajové izolace v axiálním řezu VN vinutí	[m ²]
S_n	jmenovitý zdánlivý výkon	[kVA]

$S_{n,p}$	vyzařovací (pohledová) plocha nádoby	[m ²]
$S_{n,sd}$	sdílená plocha nádoby	[m ²]
S_{pl}	plocha plechů včetně své izolace v průřezu jádra	[mm ²]
S_{stah}	plocha průřezu jednoho L-profilu stahovací konstrukce	[mm ²]
S_{vana}	obsah vnitřního povrchu vany	[mm ²]
S_{w1}	průřez fólie v NN vinutí	[mm ²]
S_{w2}	průřez vodiče ve VN vinutí	[mm ²]
$S_{g,w1,e}$	aktivní vnější chladicí svislá plocha vinutí NN	[m ²]
$S_{g,w1,i}$	aktivní vnitřní chladicí svislá plocha vinutí NN	[m ²]
$S_{g,w2,e}$	aktivní vnější chladicí svislá plocha vinutí VN	[m ²]
$S_{g,w2,i}$	aktivní vnitřní chladicí svislá plocha vinutí VN	[m ²]
t_{kanal}	rozteč příček chladicího kanálu	[mm]
t_{lgmk}	gumo-korkové těsnění mezi límcem a víkem po stranách	[mm]
t_{lguma}	guma pod aktivní částí	[mm]
t_{klin}	tloušťka klínu mezi jádrem a vnitřním NN vývodem	[mm]
t_{lep}	tloušťka lepenky, kterou je vystlaná stahovací konstrukce	[mm]
t_n	tloušťka stěny vlnovce	[mm]
$t_{pl,j}$	skutečná tloušťka celého jádra	[mm]
$t_{pl,n}$	maximální tloušťka n-tého stupně jádra	[mm]
$t_{pl,n,NN}$	tloušťka n-tého stupně jádra na NN straně	[mm]
$t_{pl,n,VN}$	tloušťka n-tého stupně jádra na VN straně	[mm]
t_{podvoz}	tloušťka podvozku	[mm]
t_{stah}	tloušťka stahovací konstrukce	[mm]
t_{stah}	tloušťka stahovací konstrukce	[mm]
t_{vana}	tloušťka plechu vany	[mm]
t_{viko}	tloušťka plechu víka	[mm]
$t_{vln,i}$	vnitřní tloušťka vlny	[mm]
t_{vyv}	tloušťka vývodu z NN vinutí	[mm]
t_{vln}	rozteč vln nádoby	[mm]
$u\%(x)$	poměr napětí v dané vzdálenosti x ku celkovému přiloženému napětí k vinutí VN	[%]
$U_{i,VN}$	Velikost zkušební indukovaného napětí VN vinutí	[kV]
u_k	jmenovité napětí nakrátko	[%]
u_k	celkové procentní napětí nakrátko	[%]
$U_{m,NN}$	nejvyšší provozní napětí na straně NN	[kV]
$U_{m,VN}$	nejvyšší provozní napětí na straně VN	[kV]
$U_{n,f1}$	jmenovité fázové napětí na straně NN	[V]
$U_{n,f2}$	jmenovité fázové napětí na straně VN	[V]
$U_{n,NN}$	jmenovité napětí na straně NN	[V]

$U_{n,VN}$	jmenovité napětí na straně VN	[V]
u_r	činná složka procentního napětí nakrátko	[%]
u_x	procentní rozptylové napětí	[%]
$u_{z,VN}$	Indukované napětí na jeden závit VN vinutí	[V]
V_{Fe}	objem celého magnetického obvodu	[m ³]
V_{hrdlo}	objem plechu hrdla límce	[m ³]
V_n	vnitřní objem nádoby bez vln	[m ³]
V_{olej}	objem oleje v nádobě	[m ³]
V_{ram}	objem plechu rámu límce	[m ³]
$V_{truhlik}$	zmenšení objemu díky zúžení vany	[m ³]
V_{vln}	vnitřní objem vln	[m ³]
$V_{vyv,pr}$	objem zabírající NN vývody a propoje	[m ³]
V_w	objem všech vinutí	[m ³]
W_m	magnetická energie cívky ve vakuu	[J]
x	relativní vzdálenost od začátku vinutí	[%]
$x_{A,j}$	relativní vzdálenost od začátku VN vinutí ke konci j-té polohy	[%]
$x_{A,j}$	relativní vzdálenost od konce VN vinutí ke konci j-té polohy	[%]
X_w	relativní přesah vnitřního vinutí NN oproti VN vinutí na jednom konci	[-]
$z_{f,pr}$	měrné náklady fázových NN propojů	[Kč/kg]
$Z_{f,pr}$	náklady za fázové NN propoje	[Kč]
z_{Fe}	měrné náklady plechů magnetického obvodu	[Kč/kg]
Z_{Fe}	náklady za plechy magnetického obvodu	[Kč]
z_{hk}	měrné náklady žebříčku hlavního chladicího kanálu	[Kč/m]
Z_{hk}	náklady za žebříček hlavního chladicího kanálu	[Kč]
z_{i1}	měrné náklady izolačního papíru v NN vinutí	[Kč/kg]
Z_{i1}	náklady za izolační papír v NN vinutí	[Kč]
$z_{i1,h}$	měrné náklady okrajové izolační pásky v NN vinutí	[Kč/kg]
$Z_{i1,h}$	náklady za okrajovou izolační pásku v NN vinutí	[Kč]
z_{i2}	měrné náklady izolační pásky ve VN vinutí	[Kč/kg]
Z_{i2}	náklady za izolační pásku ve VN vinutí	[Kč]
z_{klin}	náklady za jeden klín	[Kč/kus]
Z_{klin}	náklady za klíny	[Kč]
z_{kol}	náklady za jedno kolečko	[Kč/kus]
Z_{kol}	náklady za kolečka	[Kč]
z_n	měrné náklady plechu nádoby	[Kč/kg]
Z_n	náklady za plech nádoby	[Kč]
z_{olej}	měrné náklady transformátorového oleje	[Kč/kg]

Z_{olej}	náklady za transformátorový olej	[Kč]
Z_{podvoz}	náklady za jeden podvozek	[Kč/kus]
Z_{podvoz}	náklady za podvozek	[Kč]
Z_{prepoj}	náklady za jeden přepojovač odboček	[Kč/kus]
Z_{prepoj}	náklady za přepojovač odboček	[Kč]
$Z_{pruchNN}$	náklady za jednu NN průchodku	[Kč/kus]
$Z_{pruchNN}$	náklady za NN průchodky	[Kč]
$Z_{pruchVN}$	náklady za jednu VN průchodku	[Kč/kus]
$Z_{pruchVN}$	náklady za VN průchodky	[Kč]
Z_{stah}	měrné náklady stahovací konstrukce	[Kč/kg]
Z_{stah}	náklady za stahovací konstrukci	[Kč]
Z_{trafo}	celkové náklady za materiál transformátoru	[Kč]
Z_{v2}	zploštění vodiče VN vinutí	[%]
$Z_{vyv,Npr}$	měrné náklady NN vývodů a nulového propoje	[Kč/kg]
$Z_{vyv,Npr}$	náklady za NN vývody a nulový propoj	[Kč]
Z_{w1}	měrné náklady hliníkové fólie v NN vinutí	[Kč/kg]
Z_{w1}	náklady za hliníkovou fólii v NN vinutí	[Kč]
Z_{w2}	měrné náklady hliníkového vodiče ve VN vinutí	[Kč/kg]
Z_{w2}	náklady za hliníkový vodič ve VN vinutí	[Kč]
$\alpha_{g,n}$	součinitel přestupu tepla z nádoby do okolí	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
$\delta_{f,m}$	minimální mechanická vzdálenost dvou sousedních fází	[mm]
$\delta_{j-w1,m}$	mechanická vzdálenost mezi jádrem a vinutím NN	[mm]
$\delta_{w1-w2,e}$	elektrická vzdálenost mezi vinutím NN a VN	[mm]
$\delta_{w2-n,m}$	mechanická vzdálenost stěny od vnějšího VN vinutí	[mm]
$\Delta\vartheta_n$	tepelný spád na stěně nádoby	[K]
$\Delta\vartheta_{n-0,str}$	střední oteplení nádoby vzhledem k okolnímu vzduchu	[K]
$\Delta\vartheta_{olej-0,h}$	oteplení oleje v horní vrstvě vzhledem k okolnímu vzduchu	[K]
$\Delta\vartheta_{olej-0,str}$	střední oteplení oleje vzhledem k okolnímu vzduchu	[K]
$\Delta\vartheta_{w1-0,h}$	oteplení vinutí NN v horní vrstvě oproti okolnímu vzduchu	[K]
$\Delta\vartheta_{w1-0,str}$	střední oteplení vinutí NN oproti okolnímu vzduchu	[K]
$\Delta\vartheta_{w1-e}$	tepelný spád od středu ke svému vnějšímu povrchu vinutí NN	[K]
$\Delta\vartheta_{w1-i}$	tepelný spád od středu ke svému vnitřnímu povrchu vinutí NN	[K]
$\Delta\vartheta_{w1-olej,p}$	oteplení povrchu vinutí NN oproti oleji	[K]
$\Delta\vartheta_{w1-p}$	průměrná hodnota tepelného spádu vinutí NN na svůj svislý povrch	[K]

$\Delta\vartheta_{w2-0,h}$	oteplení vinutí VN v horní vrstvě oproti okolnímu vzduchu	[K]
$\Delta\vartheta_{w2-0,str}$	střední oteplení vinutí VN oproti okolnímu vzduchu	[K]
$\Delta\vartheta_{w2-e}$	tepelný spád od středu ke svému vnějšímu povrchu vinutí VN	[K]
$\Delta\vartheta_{w2-i}$	tepelný spád od středu ke svému vnitřnímu povrchu vinutí VN	[K]
$\Delta\vartheta_{w2-olej,p}$	oteplení povrchu vinutí VN oproti oleji	[K]
$\Delta\vartheta_{w2-p}$	průměrná hodnota tepelného spádu vinutí VN na svůj svislý povrch	[K]
λ_{Fe}	teplotní vodivost plechu nádoby	[K·m ⁻² ·W ⁻¹]
λ_i	tepelná vodivost izolačního papíru	[K·m ⁻² ·W ⁻¹]
μ_0	permeabilita vakua	[H/m]
$\rho_{Al,75}$	rezistivita hliníku při referenční teplotě	[Ω·m·mm ⁻²]
$\rho_{m,Al}$	hustota hliníku	[kg/m ³]
$\rho_{m,Cu}$	hustota mědi	[kg/m ³]
$\rho_{m,Fe}$	hustota magnetické oceli	[kg/m ³]
$\rho_{m,Fe,n}$	hustotou plechu nádoby	[kg/m ³]
$\rho_{m,Fe,stah}$	hustota železa stahovací konstrukce	[kg/m ³]
$\rho_{m,il}$	hustota izolačního papíru v NN vinutí	[kg/m ³]
$\rho_{m,il}$	hustota izolační pásky ve VN vinutí	[kg/m ³]
$\rho_{m,olej}$	hustota transformátorového oleje	[kg/m ³]
σ_{Al}	měrná elektrická vodivost hliníku	[S·m·mm ⁻²]
$\sigma_{Al,vyv}$	měrná elektrická vodivost hliníku vývodů	[S·m·mm ⁻²]
σ_{Cu}	měrná elektrická vodivost mědi	[S·m·mm ⁻²]