

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Dryformer – možnosti použití suchých transformátorů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš SEKÝRKA**

Osobní číslo: **E14B0027K**

Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**

Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

Název tématu: **Dryformer - možnosti použití suchých transformátorů**

Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište princip funkčnosti transformátoru.
2. Popište konstrukci suchého transformátoru a jeho odlišnosti od olejového transformátoru.
3. Uveďte výhody a nevýhody použití suchých transformátorů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Totzauer

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**

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

V Plzni dne 14. října 2016



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na popis obecné funkčnosti transformátoru, dále na popis suchého zalévaného a olejového transformátoru, které jsou používány v energetice. Práce se rovněž věnuje jejich vzájemnému porovnání a určení, který je vhodnější pro instalaci do konkrétního místa a proč.

Klíčová slova

Dryformer, suchý, zalévaný transformátor, vinutí, magnetický obvod, umístění transformátoru

Abstract

This bachelor thesis is focused on the description of the general functionality of the transformer, as well as on the description of the dry type encapsulated and oil type transformers, which are used in the energetics. The thesis also deals with their mutual comparison and determination, which type is more suitable for installation in a particular place and the reason why.

Key words

Dryformer, Dry type transformer, Encapsulated transformer, Winding, Magnetic circuit, Transformer placing

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 5.6.2017

Tomáš Sekyrka

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Pavlovi Totzauerovi, za cenné profesionální rady, připomínky, metodické vedení práce a za nadstandardní ochotu při komunikaci.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 TRANSFORMÁTOR	11
1.1 PRINCIP FUNKCE	11
1.1.1 Náhradní schéma transformátoru	13
1.1.2 Převod transformátoru	13
1.2 ROZDĚLENÍ TRANSFORMÁTORŮ	15
1.2.1 Podle počtu fází	15
1.2.2 Podle provedení magnetického obvodu	15
1.2.3 Podle způsobu chlazení	15
1.3 KONSTRUKCE TRANSFORMÁTORU	15
1.3.1 Magnetický obvod transformátoru	15
1.3.2 Vinutí	16
1.3.3 Chladicí systém	18
1.4 ZTRÁTY TRANSFORMÁTORU	19
1.4.1 Ztráty nakrátko (v mědi)	19
1.4.2 Ztráty naprázdno (v železe)	19
2 SUCHÝ TRANSFORMÁTOR	22
2.1 JÁDRO SUCHÉHO TRANSFORMÁTORU	23
2.1.1 Metoda Step-Lap	23
2.1.2 Materiály pro magnetické obvody	24
2.1.3 Stahování magnetických obvodů	25
2.1.4 Hluk transformátoru	25
2.2 VINUTÍ SUCHÉHO TRANSFORMÁTORU	27
2.2.1 NN vinutí	28
2.2.2 VN vinutí	29
2.3 PŘÍSLUŠENSTVÍ	31
2.4 ÚDRŽBA SUCHÝCH TRANSFORMÁTORŮ	32
3 POROVNÁNÍ SUCHÉHO A OLEJOVÉHO TRANSFORMÁTORU	33
3.1 ROZDÍLY V KONSTRUKCI	33
3.1.1 Magnetický obvod	33
3.1.2 Vinutí	33
3.1.3 Chlazení	33
3.1.4 Obecně	34
3.2 ROZDÍLY EKONOMICKÉ	35
3.2.1 Pořizovací náklady	35
3.2.2 Provozní náklady	35
3.3 ROZDÍLY V MOŽNOSTI INSTALACE	35
3.4 PROVOZNÍ ROZDÍLY	36
3.4.1 Normální stav	36
3.4.2 Při poruše	36
ZÁVĚR	38
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	40

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá popsáním netočivých elektrických strojů pro přeměnu elektrických hodnot signálu, takzvaných transformátorů. Tyto stroje jsou mimo jiné nedílnou součástí elektrizačních soustav, kde hrají nezbytnou roli při transformaci hodnot signálu. Jak se lze dozvědět po přečtení této práce, transformátor neslouží jen k tomuto účelu. Ač by se mohlo zdát, že transformátory jsou již na vrcholu svého vývoje a že již není co dále vylepšovat, není tomu tak. Jelikož cena elektrické energie neustále stoupá, je snaha vyrábět transformátory s co možná nejnižšími ztrátami a nelze opomíjet ani ochranu životního prostředí, jelikož toto téma je v posledních letech velmi diskutované.

Dílo lze rozdělit do tří tematických celků. Zaprvé obecný popis klasického transformátoru, dále popis suchého zalévaného transformátoru a ve třetí části práce je jejich vzájemné porovnání, popsání výhod a nevýhod a následné zhodnocení.

První část se zabývá obecným popisem transformátoru, to znamená principem funkčnosti, rozdělením transformátorů podle druhu konstrukce a v závěru první části jsou popsány ztráty v transformátorech.

V druhém celku je rozebrán suchý transformátor – Dryformer. Tuto část práce je možné dále rozdělit na popis magnetického obvodu, popis primárního a sekundárního vinutí, dále je zde uvedeno něco o příslušenství dodávaného se suchými transformátory a na konci druhé části je psáno o údržbě těchto strojů.

Další tematický celek se zabývá porovnáním dvou předešlých zmíněných možností provedení konstrukce transformátoru. Jsou zde uvedeny klady i negativa jednotlivých eventualit. Konkrétně je tato část bakalářské práce členěna z pohledu konstrukce, to jest mechanické rozdíly v transformátorech, dále difference co se týče hospodárnosti, rovněž jsou zde popsány rozdíly v možnosti instalace a poslední bod pojednává o rozporu při provozu.

Seznam symbolů a zkratek

k, p	Transformační poměr [-]
f	Frekvence [Hz]
U	Elektrické napětí [V]
I	Elektrický proud [A]
u	Indukované elektrické napětí [V]
N	Počet závitů na vinutí [-]
Φ	Magnetický tok [Wb]
V	Objem [m ³]
S	Plocha [m ²]
P	Výkon [W]
R	Elektrický odpor [Ω]
X	Reaktance [Ω]
B	Magnetická indukce [T]
H	Intenzita magnetického pole [A/m]
ρ	Rezistivita feromagnetika [$\Omega \cdot m$]
d	Tloušťka feromagnetika [V]
Δp	Ztrátové číslo transformátorového plechu [W/kg]
VN	Vysoké napětí [V]
NN	Nízké napětí [V]

1 Transformátor

Transformátor lze definovat jako elektrický netočivý stroj, který slouží k přeměně elektrického signálu, konkrétně transformaci napětí a proudu, při nezměněném kmitočtu. Princip je založen na elektromagnetické indukci.

Nejčastěji lze vidět transformátory, které slouží ke snížení hodnoty elektrického napětí, ale samozřejmě existují i takové stroje, které hodnotu napětí zvyšují. A jak víme, vysoké napětí je zapotřebí pro přenos elektrické energie od výrobce ke spotřebiteli, jelikož Jouleovy ztráty rostou s druhou mocninou elektrického proudu. Chceme-li přenášet stejný výkon s co nejnižším proudem, je potřeba patřičně zvýšit hodnotu napětí. Naopak u spotřebitele je nutné hodnotu elektrického napětí snížit, například kvůli bezpečnosti. Lze tedy konstatovat, že transformátor je nezbytnou součástí elektrizační sítě.

Další funkcí transformátoru je galvanické oddělení dvou obvodů. To znamená, že jedna část obvodu není spojena vodičem s druhou, ale přesto dochází k výměně energie.

Jelikož je možnost použití transformátorů opravdu rozmanitá, vyrábí se v mnoha modifikacích. Záleží, co od nich uživatel žádá. Co se týče výkonu, jsou transformátory s výkonem od jednotek mVA až do stovek MVA. Dále lze rozdělit transformátory podle počtu fází na jednofázové a vícefázové (nejčastěji trojfázové), podle konstrukčního provedení na jádrové a plášťové.

Jak už bylo uvedeno, jsou to stroje netočivé, tudíž neobsahují točivé části a neexistují zde ztráty třením, které snižují efektivitu strojů točivých (motorů). Transformátory dosahují vysokých účinností. Obecně platí, že čím větší transformátor, tím vyšší účinnost. U transformátorů malých výkonů převažují ztráty nakrátko. U vysokých výkonů se lze dostat na účinnost až 99,5%. Náklady a nároky na údržbu jsou také relativně nízké. [1]

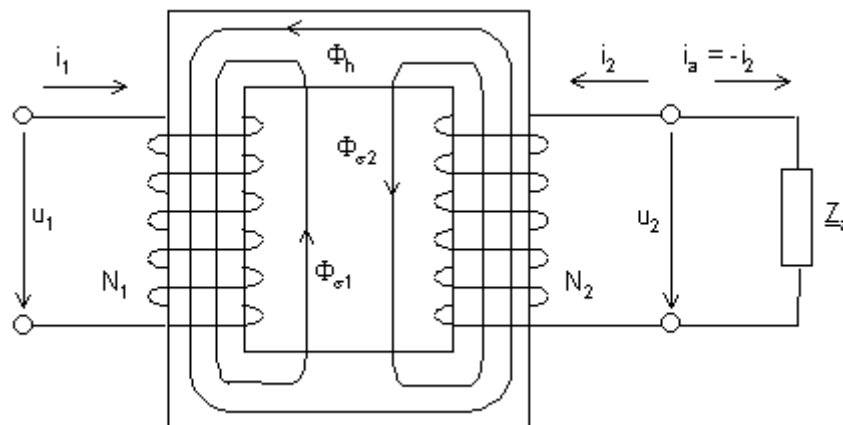
1.1 Princip funkce

Zjednodušeně lze tvrdit, že když na primární vinutí N_1 připojíme elektrické napětí o určité hodnotě u_1 , začne jím protékat proud i_1 , který v primárním vinutí vybudí

elektromagnetický tok Φ_1 , který začne protékat magnetickým obvodem a v sekundární cívice N_2 způsobí naindukování napětí u_2 . Vytvoříme-li na sekundární straně uzavřený elektrický obvod, začne jím protékat proud i_2 , který v sekundárním vinutí vybudí magnetický tok Φ_2 . Magnetickým obvodem potom protéká výsledný magnetický tok Φ_h , který je dán působením obou dílčích toků. Jelikož nedokážeme vytvořit magnetický obvod s nekonečnou magnetickou vodivostí, vznikají v reálných případech rozptylové magnetické toky $\Phi_{\sigma 1}$ a $\Phi_{\sigma 2}$, které se uzavírají mimo jádro transformátoru a nepodílejí se na přenosu energie. Indukované napětí je závislé na počtu závitů N , frekvenci f , maximální hodnotě magnetického toku Φ_m . [3]

$$u_{i1} = 4,44 \cdot N_1 \cdot \Phi_m \cdot f \text{ [V]} \quad (1.1)$$

$$u_{i2} = 4,44 \cdot N_2 \cdot \Phi_m \cdot f \text{ [V]} \quad (1.2)$$



Obrázek 1: Princip funkce transformátoru [5]

kde:

u_{i1}je indukované napětí na primárním vinutí [V]

u_{i2}je indukované napětí na sekundárním vinutí [V]

N_1je počet závitů primárního vinutí [-]

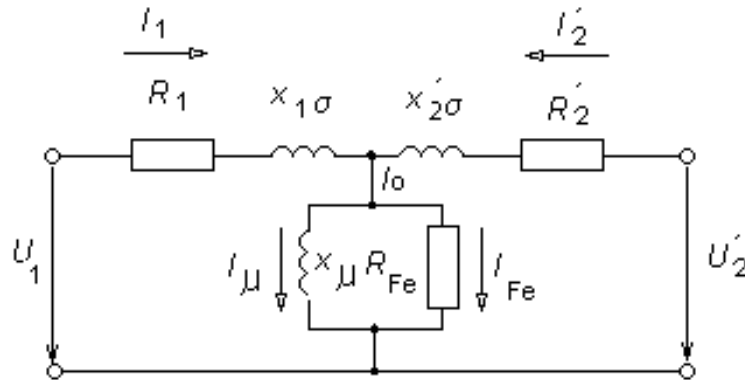
N_2je počet závitů sekundárního vinutí [-]

Φ_mje maximální hodnota střídavého magnetického toku [Wb]

fje kmitočet primárního napětí [Hz]

1.1.1 Náhradní schéma transformátoru

Transformátor si lze při určitém zjednodušení představit jako kombinaci pasivních prvků R a L , odporů a indukčností. Výsledný odvod potom odpovídá vlastnostem transformátoru.



Obrázek 2: Náhradní schéma transformátoru (převzato z [6])

kde:

R_1 odpor primárního vinutí [Ω]

R'_2 odpor sekundárního vinutí přepočtený na primární [Ω]

$X_{1\sigma}$ rozptylová reaktance vstupního vinutí [Ω]

$X'_{2\sigma}$ rozptylová reaktance výstupního vinutí přepočtená na primární [Ω]

R_{FE} odpor reprezentující ztráty v železe [Ω]

X_μ hlavní reaktance transformátoru [Ω]

I_0 proud naprázdno [A]

1.1.2 Převod transformátoru

Jeden ze základních parametrů transformátoru je jeho převod. Značí se k (v některé literatuře p) a udává poměr mezi indukovanými napětími. Udává nám tedy, jaké bude napětí na sekundárních svorkách při známém napětí na svorkách primárních, při zanedbání ztrát.

$$k = \frac{u_{i2}}{u_{i1}} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} \quad (1.3)$$

Je-li transformační poměr $k > 1$, výstupní napětí je logicky vyšší než vstupní a transformátor je zvyšovací. Používá se především v elektrárnách, kde je zapotřebí zvýšit elektrické napětí pro distribuci. Dále se používají například u zapalovacích cívek u zážehových motorů, u mikrovlnných zařízení atd.

Je-li transformační poměr $k < 1$, výstupní napětí je logicky menší než vstupní a transformátor je snižovací. Používá se v distribučních soustavách pro snížení hodnoty elektrického napětí kvůli bezpečnosti a praktičnosti u spotřebitele. Dále je možné použít tento typ pro nabíječky akumulátorů, hračky, spotřebiče v domácnosti a mnohé další. V praxi se nejčastěji setkáváme právě se snižovacími transformátory.

Je-li transformační poměr $k = 1$, výstupní napětí se ideálně rovná vstupnímu, tedy počet závitů na primárním vinutí se (přibližně) rovná počtu na sekundárním. Tento typ transformátoru se nazývá oddělovací. Tento typ nijak netransformuje signál, ale používá se pro galvanické oddělení dvou obvodů. V praxi má oddělovací transformátor počet závitů na sekundárním vinutí o něco vyšší, aby při provozu dorovnal snížení napětí, které vzniklo ztrátami v transformátoru.[3]

1.2 Rozdělení transformátorů

1.2.1 Podle počtu fází

Podle počtu fází můžeme transformátory rozdělit na:

- *Jednofázové*
- *Trojfázové*
- *Popřípadě vícefázové*

Jednofázové transformátory se nejčastěji používají u spotřebitelů a pro malé výkony (desítky až stovky wattů). Většinou mění napětí z vyššího na nižší a běžně bývají chlazené vzduchem. Trojfázové transformátory se používají pro přenos elektrické energie a pracují s výkony až stovek megawattů. Takové stroje se již chladí olejem. [2]

1.2.2 Podle provedení magnetického obvodu

- *Jádrové provedení*
- *Plášťové provedení*

Transformátory s jádrovým provedením magnetického obvodu se používají převážně u výkonových aplikací, tedy i pro třífázové stroje kvůli lepšímu odvodu tepla. Provedení plášťové má součinitel odvodu tepla horší, zato má díky své konstrukci pevnější magnetickou vazbu, to kvůli omezenému rozptylovému toku. [2]

1.2.3 Podle způsobu chlazení

- *Vzduchové*
- *Olejové [2]*

1.3 Konstrukce transformátoru

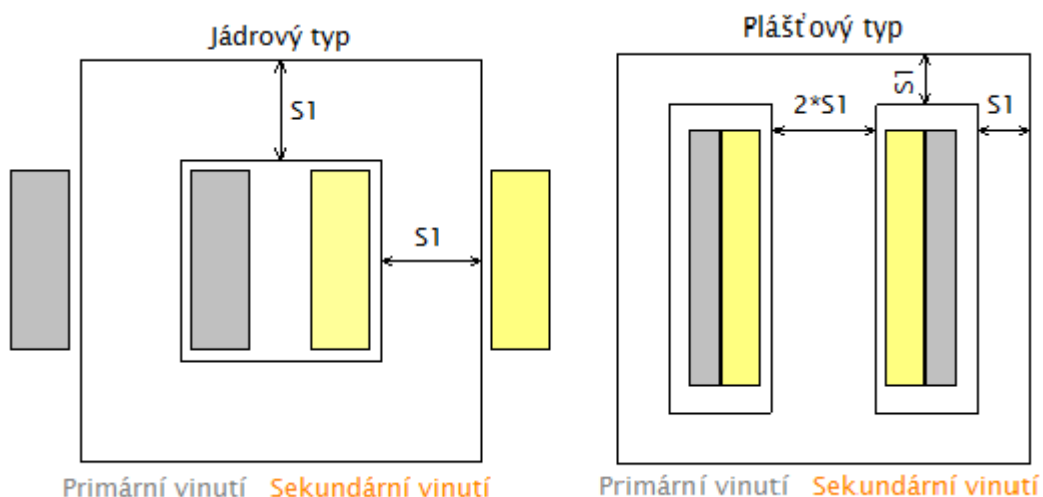
Základní části transformátoru tvoří magnetický obvod, vinutí a chladicí systém.

1.3.1 Magnetický obvod transformátoru

Magnetický obvod, také nazývaný jádro, slouží k uzavírání magnetického toku. Cílem jádra je odvedení co nejvíce magnetického toku z primární cívky do sekundární, tedy

eliminace rozptylového toku. Toto jádro se obvykle skládá z elektrotechnických plechů o tloušťce 0,35 nebo 0,5 mm, které jsou od sebe izolovány nevodivou vrstvou nejčastěji lakem nebo chemickou vrstvou. Využití izolovaných plechů namísto jednolitého jádra výrazně snižuje ztráty způsobené vířivými proudy. Plechy jsou konstruovány ze speciální oceli s příměsí křemíku, ten zvyšuje jejich elektrický odpor, což má za následek další snížení ztrát. Pro omezení hysterezních ztrát bývá využíváno orientovaných plechů válcovaných za studena, které vykazují lepší magnetické vlastnosti při magnetování ve směru válcování. Výběr použitého materiálu pro magnetický obvod určuje mimo jiné ztráty v něm. Důležitým faktorem při návrhu je frekvence signálu, při které bude stroj pracovat. Například pro frekvenci vyšší než 500 Hz jsou používány práškové ferity.[1]

Hlavní dělení transformátorů podle druhu magnetického obvodu je na jádrové a plášťové.



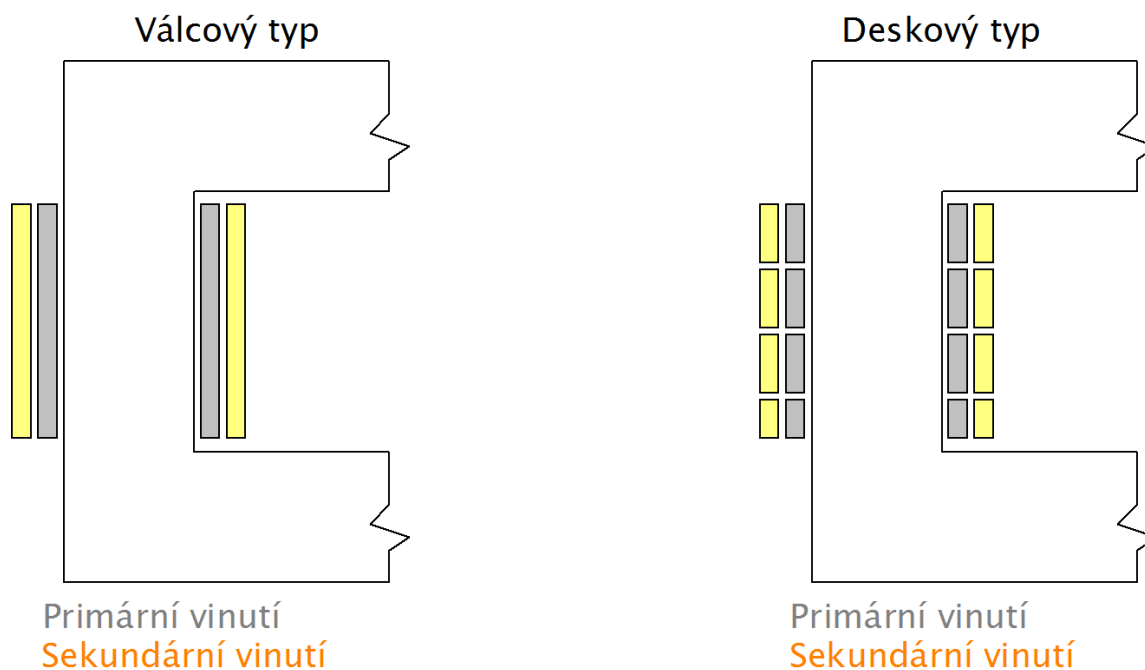
Obrázek 3: Typy magnetických obvodů [1]

Mezi další možné provedení magnetického obvodu patří například hrníčkové provedení, či toroidní provedení.

1.3.2 Vinutí

Každý transformátor má primární a sekundární vinutí. Konstruuje se z měděných nebo také hliníkových vodičů nejčastěji kruhového průřezu, které jsou určitým způsobem navinuty na cívkové tělísko (kostru), výjimkou není průřez obdélníkový. U výkonových transformátorů se můžeme setkat s dutým vinutím, kde cíleně zvyšujeme plochu vodiče

kvůli efektivnějšímu chlazení. V dutině může také cirkulovat chladící médium. Vinutí můžeme rozdělit na dva základní typy: desková a válcová. Deskové vinutí se skládá ze střídajících se kotoučů cívek primárního a sekundárního vinutí. V případě vinutí válcového jsou cívky navinuty po celé délce jádra, přičemž je na jádře navinutá cívka jedna a na ní pak druhá. Počet závitů na primární a sekundární cívce, respektive jejich poměr, udává převod transformátoru označený k . Uspořádání vinutí pak v provozu ovlivňuje velikost napětí nakrátko a dynamické síly, které na vinutí působí.[1]



Obrázek 4: Typy vinutí [1]

Vodič vinutí je zapotřebí izolovat. Jednak proti zkratu na magnetický odvod, jednak proti zkratu mezi jednotlivými závitů. Ochrana před zkratem s magnetickým odvodem zajišťuje kostra, na které je vinutí navinuto. Kostra vinutí může mít kruhový nebo čtyřhranný tvar průřezu. Vyrábí se nejčastěji z tvrzeného papíru, či plastu (polyamid, nebo sklem plněné plasty). K ochraně zkratu mezi závitů se používá například lakovaných nebo smaltovaných vodičů. Jednotlivé závitové vrstvy mohou být prokládány dalším izolantem, například impregnovaným papírem. Tato vrstva se následně ve větší míře vkládá i mezi primární a sekundární vinutí, leží-li na sobě. Celé vinutí se poté může zpevnit impregnací. [4][13]

1.3.3 Chladicí systém

Chlazení transformátoru je jako u každého elektrického přístroje důležité z hlediska bezpečného provozu a prodloužení životnosti izolace, ta totiž při zvýšených teplotách degraduje rychleji. Menší typy transformátorů mohou být suché s litou izolací, avšak běžné výkonové transformátory bývají izolovány a chlazeny olejem. Nejčastěji lze v transformátorech najít oleje minerální, vyrobené zpracováním ropy. V dnešní době je hojně zkoumán olej rostlinný. Ten při úniku nepředstavuje takové ekologické znečištění, jelikož neobsahuje žádné příměsi ropných a silikonových olejů. Rostlinné oleje v transformátorech přináší i vyšší bezpečnost. Oproti ropným olejům disponují obdobnými dielektrickými vlastnostmi, jež brání proti průrazu elektrickým obloukem, mají však výrazně vyšší teplotu vznícení, která ještě více snižuje riziko požáru. Příkladem rostlinného oleje je například Envirotemp FR3, který má světle nazelenalou barvu a bod varu přibližně 360 °C. Další možností je BIOTEMP, který vyrábí společnost ABB. Transformátory malých výkonů mohou být chlazeny přirozeným prostupem tepla do okolí, středních a vyšších výkonů pomocí ventilátorů, usnadňujících výměnu tepla mezi chladičem a okolním vzduchem. Při velkých výkonech mohou mít transformátory nucený oběh oleje, kdy je olej chlazen samostatným chladičem umístěným mimo transformátor.

V normě ČSN EN 60076 jsou ukotvena 3 základní pravidla pro chlazení, která je nutné dodržet. Průměrná roční teplota 20°C, maximální denní průměrná teplota 30°C a maximální špičková teplota 40°C. [1][10]

Druhy chladiv a jejich označení:

- ***O-oleje***
- ***A-vzduch***
- ***W-voda***
- ***L-nehořlavá izolační kapalina***
- ***G-plyn***
- ***S-pevný izolant [2]***

Způsob oběhu chladiva a jeho označení:

- ***N-přirozený***
- ***D-nucený řízený[2]***
- ***F-nucený neřízený***

Spojení těchto písmen nám tedy vypovídá, jak je konkrétně daný transformátor chlazen. Na štítku transformátoru můžeme tedy najít například písmena AN, které znamenají, že se jedná o transformátor s přirozeným chlazením. Písmena AF vypovídají o tom, že je stroj chlazen vzduchem pomocí ventilátoru. Dále se můžeme setkat se spojením písmen ONAN (ONAF), které znamenají, že je transformátor chlazen olejem v uzavřené nádobě, která je chlazená vzduchem (vzduchem za pomoci ventilátoru).

1.4 Ztráty transformátoru

Co se týká ztrát v transformátorech respektive jejich účinností, dosahují velmi vysokých čísel. Zvláště u energetických výkonových transformátorů se účinnost pohybuje kolem 99,5%. U malých strojů převažují ztráty nakrátko a účinnost se pohybuje kolem 90%. Jako hlavní ztráty v transformátoru se uvádí ztráty nakrátko a naprázdno.

1.4.1 Ztráty nakrátko (v mědi)

Ztráty nakrátko vznikají průchodem proudu v primárním (sekundárním) vinutí cívky, kde se část elektrická energie mění na Jouleovo ztráty, tj. je vyzářena v podobě tepla. Tyto ztráty rostou s kvadrátem proudu a tak rostou při zvyšování zatížení transformátoru.

Ztráty nakrátko se měří tak, že výstupní svorky transformátoru zapojíme do zkratu a na vstupu zvyšujeme hladinu napětí až do té doby, kdy se na vstupním obvodu objeví nominální proud. Napětí nakrátko je štítkovou hodnotou transformátoru, která se udává procentuelně vyjádřená z poměru k jmenovitému napětí. Čím větší je hodnota napětí nakrátko, tím nižší jsou ztráty ve vinutí. [4]

1.4.2 Ztráty naprázdno (v železe)

Za ztráty naprázdno (v železe) uvažujeme především ztráty v magnetickém obvodu, jelikož tento typ ztrát je ve vinutí transformátoru zanedbatelný. Rozdělují se na hysterezní, ty jsou úměrné energii, kterou potřebujeme k přemagnetizování jádra při střídavém magnetování a na ztráty vířivými proudy. Vířivé proudy vznikají jak v magnetickém obvodu, tak i ve vinutí, ovšem ve vinutí jsou v porovnání zanedbatelné. Vířivý proud vzniká na principu Faradayova zákona, kdy se v magnetickém obvodu naindukuje napětí a

začne protékat proud. Pro snížení těchto ztrát se jádra transformátorů vyrábějí z navzájem izolovaných plechů.

Ztráty hysterezní: závisí na 1. mocnině frekvence (1.4) a jsou úměrné velikosti plochy hysterezní smyčky (křivky), proto je třeba, aby použité plechy měly hysterezní křivku co nejužší (materiály magneticky měkké). Pro další omezení hysterezních ztrát bývá využíváno orientovaných plechů válcovaných za studena, které vykazují lepší magnetické vlastnosti při magnetování ve směru válcování. Tj. nižší magnetický odpor ve směru válcování. [1]

$$P_h = f \cdot S_s \cdot V [W] \quad (1.4)$$

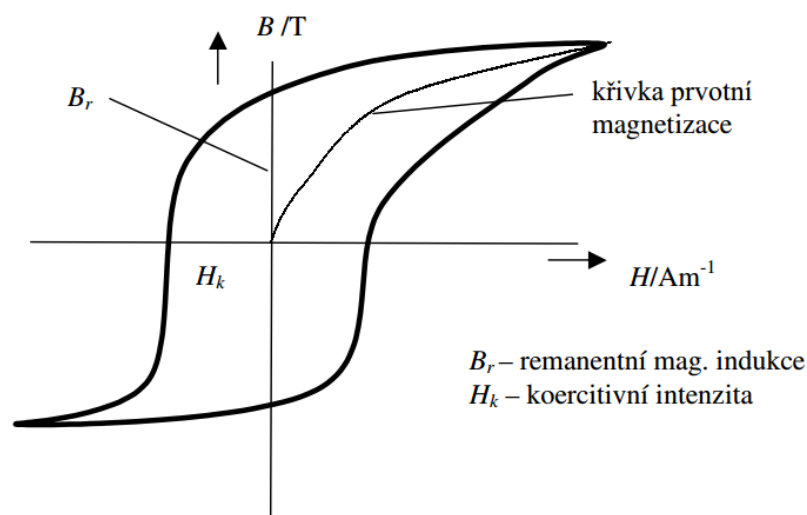
kde:

f..... frekvence magnetického pole

V..... objem feromagnetika

S_s..... plocha hysterezní smyčky

Hysterezní smyčka je jakýmsi parametrem magnetického materiálu, který zobrazuje závislost magnetické indukce B[T] na intenzitě magnetického pole H[A/m]



Obrázek 5:Hysterezní smyčka[22]

Ztráty vířivými proudy: závisí na 2. mocnině frekvence (1.5). Omezí se zvýšením elektrického odporu železa v magnetickém obvodu. Zvýšením měrného el. odporu se docílí přidáním křemíku (značka Si, latinsky Silicium) do materiálu. Je ale třeba brát v potaz, že po přidání křemíku se stává plech křehčím, což zhoršuje jeho mechanické vlastnosti. Dále se tyto ztráty omezují tím, že jednolitě jádro rozdělíme na plechy, navzájem od sebe izolované.

$$P_v = \frac{4}{3} \cdot d^2 \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot \frac{V}{\rho} [W] \quad (1.5)$$

kde:

f..... frekvence magnetického pole

V..... objem feromagnetika

ρ rezistivita feromagnetika

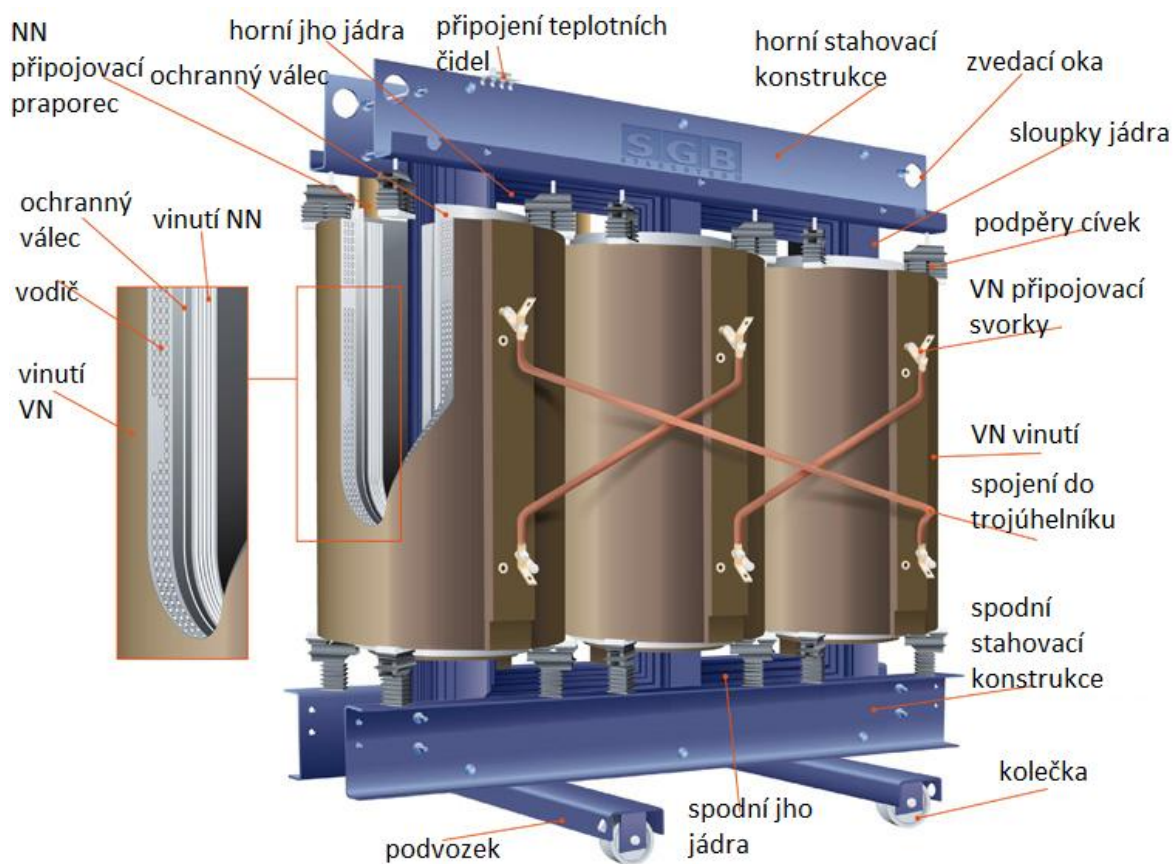
d..... tloušťka feromagnetika

B..... indukce magnetického pole

2 Suchý transformátor

Suchý, nebo také zaléváný transformátor je přístroj, u kterého není jako chladicí médium použita kapalina a vinutí se zalévá syntetickou pryskyřicí. Tento typ transformátorů se vyrábí od 70. let 20. století a po celém světě jich lze najít stovky tisíc. Jeho hlavní výhodou je možnost použití na místech, kde se olejový transformátor nesmí používat kvůli bezpečnosti, například pro ohrožení spojené s požárem olejové náplně, nebo jejím únikem do životního prostředí. Vyrábí se pro pracovní napětí do 35kV a pro výkony až 25MVA.

Principiálně suchý transformátor funguje totožně jako klasický transformátor. Rozdíly nastávají v provedení magnetického obvodu, primárního a sekundárního vinutí a dalších konstrukčních komponent, jak je vidět na *Obr.6.*[7]

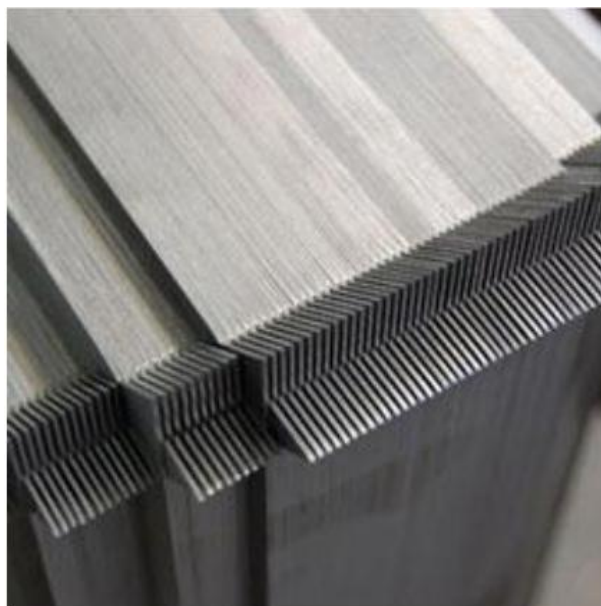


Obrázek 6: Řez suchým transformátorem[8]

2.1 Jádru suchého transformátoru

Na jádro suchého transformátoru jsou kladeny nejrůznější požadavky. Především jsou důležité tři parametry. Jedná se o ztráty naprázdno, ztráty nakrátko a hlučnost transformátoru, která vzniká chvěním jednotlivých plechů, při nedostatečném stažení a zpevnění magnetického obvodu. Vhodný výběr použitých materiálů a postupů při výrobě je proto nezbytný. U vyšších výkonů se používá výhradně kruhový průřez jádra, respektive je snaha se kruhovému průřezu co nejvíce přiblížit. Tuto myšlenku omezuje náročnost skládání plechů, jelikož v ideálním případě by měl každý plech jiný rozměr, a tím i finanční náročnost. Pro snížení hluku a ztrát je v magnetických obvodech transformátorů vyšších výkonů použita metoda Step-Lap. Pro dobré vlastnosti magnetického obvodu, tj. především nízké ztráty, je důležitý především výběr použitého materiálu.

2.1.1 Metoda Step-Lap



Obrázek 7: Detail metody Step-lap (převzato z [10])

Pokrok od klasických EI plechů. U EI plechů se jádro skládá pravoúhle, tak že sloupky magnetického obvodu, okénka pro vinutí i kostřička pro vinutí vychází pravoúhle. Pravoúhlé se zaoblenými rohy jsou rovněž spodní vrstvy vinutí, teprve ve vyšších vrstvách vinutí zaoblení převažuje a vytváří celkově válcový vzhled. Jednou ze zanedbávaných nevýhod EI jader je také to, že na části E plechu necháváme téct magnetické siločáry kolmo na směr snazší magnetizace. V té části obvodu jsou nuceny projít stěnou plechu do sousedních I plechů, které už nesou svoji část magnetického toku, kterou převzaly od E

plechů ve své rovině. Při tom musí magnetický tok překonat mezeru mezi E a I plechem, což dělá také tak, že z části přejde do sousedního E plechu, tím se lokálně zvyšuje sycení materiálu nad hodnotu průměrnou v objemu daného obvodu.

V moderních transformátorech vyšších výkonů jsou šířky plechů odstupňovány tak, aby se průřez všech jednotlivých sloupků více podobal neefektivnějšímu, tedy kruhovému. V nejjednodušším případě jsou to dvě šířky, které po složení vytvoří průřez ve tvaru pravidelného kříže. Dál lze stupňovat více různých šířek, čímž vytvoříme průřez s více „schody“. V nejsložitějším případě má každý plech svoji šířku a po správném složení vytvoří sloupek kruhového průřezu. Všechny sloupky mají směr snazší magnetizace shodný se svým podélným geometrickým rozměrem. Pro navázání magnetického toku ze sloupků s rovnoběžnou osou s vinutím na sloupky, které jsou k nim umístěny kolmo, jsou u jednotlivých plechů provedeny záseky přibližně pod úhlem 45° , do kterých co nejpřesněji zapadá příslušný plech navazujícího sloupku. Aby bylo omezeno lokální přesycování materiálu, jsou tyto zářezy různě hluboké, tak aby místa navazování toku nesousedila ani u sousedních vrstev, ani u ob sousedních (viz. EI obvod). V praxi tak vznikají trojúhelníkové zuby opět pod úhlem přibližně 45° , jak je vidět na *Obr.7*. V nejdokonalejším případě by byl každý zásek jinak hluboký, aby se nepřekrýval s žádným dalším ve svém místě napojení sloupků. Správné složení takového magnetického obvodu vyžaduje vysokou technologickou úroveň, ať už pracovníků při ručním skládání, nebo od automatů při strojovém sestavování.[7][8]

2.1.2 Materiály pro magnetické obvody

Elektrotechnické plechy lze rozdělit na válcované za tepla a za studena. Elektrotechnické plechy válcované za tepla se podle obsahu křemíku dělí na dynamové (3,5 – 4,5 %) a transformátorové (0,3 – 3,5 %), které mají menší měrné ztráty. U elektrotechnických plechů válcovaných za studena vzniká tzv. Gossova textura, to znamená, že hrany krystalů jsou rovnoběžné se směrem válcování a tyto materiály s orientovanou strukturou se ve směru válcování snáze magnetují a mají výrazně menší měrné ztráty v tomto směru.

Plechů jsou charakterizovány ztrátovým číslem Δp , které udává velikost ztrát v 1 kg plechů při indukci 1,0, nebo 1,5 T (pak se značí $\Delta p_{1,5}$) a frekvenci 50 Hz. Běžné hodnoty ztrátového čísla plechů při indukci 1,0 T a tloušťce 0,5mm jsou $\Delta p = 1,6 \div 3$ [W/kg] a při

tloušťce 0,35mm jsou $\Delta p = 1,2 \div 2$ [W/kg]. U suchých transformátorů se používají plechy s typickým ztrátovým číslem 0,85 W/kg a méně.[9]

2.1.3 Stahování magnetických obvodů

Pro správnou funkci transformátoru je důležité správné stažení a zafixování transformátorových plechů v jádře. Na poskládané plechy se nanese tepelně odolný lak, který chrání plechy proti korozi a zároveň plechy k sobě slepí a vyplní případné vzduchové mezery. Jádro se následně stáhne pomocí svorníků. Pokud dojde k uvolnění plechů a jejich následnému rozvibrování, může být poškozena izolace mezi plechy. Porušeným místem mohou procházet vířivé proudy, železo se zahřívá a oxiduje. Oprava této poruchy je velmi komplikovaná. Spočívá ve výměně poškozených plechů, opětovné kompletaci a stažení jádra. [10]

2.1.4 Hluk transformátoru

Asi každý už někdy slyšel ten nepříjemný zvuk, který vydává transformátor. Jedná se především o kombinaci dvou jevů. Zaprvé projevu silového účinku elektromagnetického pole a zadruhé magnetostrickce. První příklad si lze představit jako reproduktor, kde je sice zvukový výstup žádaný, ale v principu jde o totéž. Průchodem střídavého magnetického toku dochází k rozkmitání nedostatečně stažených transformátorových plechů, které svými vibracemi, s frekvencí dvojnásobnou od frekvence zdroje signálu, způsobují hluk. Druhým příkladem je magnetostrickce. Je to jev, při kterém dochází ke změně rozměrů objektu, jež je ovlivněn působením magnetického pole. Euweb [12] uvádí, že díky magnetostrickci se transformátor, který má délku jádra jeden metr, roztáhne (smrští) o jeden mikrometr. Dokonce i tato nepatrná změna stačí pro vytvoření slyšitelného zvuku.

Výrobci transformátorů uvádějí, že je v dnešní době kladen veliký důraz na nízké hodnoty hluku transformátorů. Orientačně je dnes možné vyrobit suché transformátory, které mají, pro výkon v řádech stovek kVA, hodnoty akustického tlaku L_p do 30dB, měřeno 1m od odběrné plochy. Zde je rozdíl od olejových transformátorů, kde se hluk měří ve vzdálenosti 0,3m. Hladina akustického tlaku se spočítá jako poměr naměřené hladiny hluku s referenční hodnotou. Referenční hodnota akustického tlaku $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

$$L_p = 10 \log \frac{P}{p_0} [dB] \quad (2.1)$$

kde:

p hladina akustického tlaku

p_0 referenční hodnota akustického tlaku

Pro srovnání tabulka s typickými hodnotami hluku v dB.

Zdroje zvuku (šumu) Příklady se vzdáleností	Hladina akustického tlaku L_p dB SPL
Tryskové letadlo, vzdál. 50 m	140
Práh bolesti	130
Práh nepříjemnosti	120
Řetězová pila, vzdál. 1 m	110
Diskotéka, 1 m od reproduktoru	100
Dieselový tahač, vzdál. 10 m	90
Chodník rušné ulice, 5 m od vozovky	80
Vysavač, vzdál. 1 m	70
Běžný hovor, vzdál. 1 m	60
Průměrná domácnost	50
Tichá knihovna	40
Tichá ložnice v noci	30
Pozadí v TV studiu	20
Vzdálený šum listí	10
Práh slyšení	0

Tabulka 1: Přehled hladin akustického tlaku [18]

Chceme-li snížit hladinu hluku, máme na výběr dvě cesty, které je však dobré kombinovat. Jednak je snaha o snížení vzniku hluku v transformátoru, to se provádí například tím, že se při výrobě magnetického obvodu použije metoda Step-Lap. Dále je pak snaha zamezení rozšíření hluku například do jiných místností skrz stavební konstrukci tvrdých mechanickým spojem. Je potřeba transformátor vždy uložit pružně, přes pružné pryžové spojky, tzv. antivibrační podložky.[12][23]

2.2 Vinutí suchého transformátoru

Na vinutí všech typů transformátorů jsou kladeny následující požadavky:

- **Výborná elektrická vodivost** – pro snížení ztrát ve vinutí a hospodárnějšímu chodu
- **Mechanická pevnost** – pro odolávání mechanických rázů při montáži a při přepětí
- **Odolnost proti tepelnému namáhání** – při zahřívání vinutí, způsobeného průchodem elektrického proudu, je zapotřebí teplo odvádět a zajistit nepoškození izolace
- **Proveditelnost** – výroba musí být reálně mechanicky uskutečnitelná a ekonomicky přijatelná [7]

Téměř u všech typů suchých transformátorů pro vyšší výkony se vinutí zalévají do pryskyřice, a to především ve vakuu, kvůli eliminaci vzduchových bublinek, které by zhoršovaly elektrické vlastnosti. Hlavním důvodem, pro použití pryskyřice jsou její elektrické vlastnosti, konkrétně vnitřní rezistivita 10^{13} až 10^{15} $\Omega\cdot\text{m}$. Z mechanických vlastností vyčnívá výbornou přilnavostí, prakticky ke všem materiálům a dobrou mechanickou odolností [11].

Mezi často používané izolační materiály patří **Nomex**. Jedná se o syntetický materiál vyrobený z malých vláken aromatického polyamidu. Velmi dobře odolává vysokým teplotám - až 220 °C, má výborné elektrické vlastnosti - $E_p = 40\text{kV/mm}$, vysokou pevnost v tahu, je samozhášivý a nehořlavý, odolává účinkům chemikálií a rozpouštědel. Pro své vynikající vlastnosti se často používá například pro aplikaci v elektrických strojích.[13]

Často využívanou metodou vakuového zalévání je **VPI** (Vacuum Pressure Impregnation). Jde o způsob výroby hlavní izolace, při kterém je základním materiálem savá slídová páska, která se při procesu impregnování prosytí impregnantem. Jako impregnant se používají epoxidové, polyesterové a silikonové pryskyřice. Ty mají velmi dobré elektrické i mechanické vlastnosti a krátkou vytvrzovací dobu. Při použití bezrozpouštědlových epoxidových pryskyřic je tato technologie šetrná k životnímu prostředí. Proces izolování začíná vysoušením objektu, dále přeneseme objekt do impregnačního kotle, kde je vytvořeno vakuum, následuje zaplavení kotle ode dna. Po hodině čekání na prosáknutí ke všem vrstvám je zrušeno vakuum a v nádobě je vytvořen

přetlak. Následuje vypuštění laku a vysoušení. Na závěr je důležitá výstupní kontrola kvality.[13]

2.2.1 NN vinutí

Vinutí nízkého napětí je nejčastěji provedeno jako fóliové. Fóliové vinutí se vyrábí z měděných nebo také hliníkových pásů. U měděného provedení jsou obvykle tloušťky fólie 0,3-2,5 mm, u hliníkového 0,3-2,8 mm. Při návrhu je rozhodující hodnotou jmenovitý proud. Tyto fólie jsou široké přes celou šířku jádra a jsou navinuty podobně jako svitkový kondenzátor. Použitím této metody je docíleno optimální proudové hustoty po celém vinutí, což zajišťuje vyšší odolnost proti zkratu. Na vinutí tedy nevznikají nebezpečně horká místa. Kontrola kvality používaných fólií je nezbytná. Je důležité, aby bylo zajištěno kvalitní střížení fólií, tedy eliminace otřepů. To je nutný předpoklad pro námi požadovanou elektrickou pevnost, a tak se vinutí vyrábí ve speciálních válcovnách. Důležitým bodem při konstrukci je také způsob elektrického spojení fóliového vinutí s přípojnici. Mezi dvě nejpoužívanější metody patří svaření pod ochrannou atmosférou a svařování za studena pod vysokým tlakem. Výrobci se shodují, že výhodnějším řešením je svařování za studena, které má několik výhod. Například, že při svařování za studena nedochází ke změně vnitřní struktury svařovaného materiálu vlivem teplotního procesu. Také nedochází k výskytu cizích těles, které mohou vznikat během svařování.

<i>Třída izolace</i>	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>
<i>Maximální teplota [°C]</i>	<i>130</i>	<i>155</i>	<i>180</i>

Tabulka 2:Třídy izolací [17]

Mezi jednotlivé vrstvy je vkládána mezizávitová izolace. Tato izolace se konstruuje z materiálů teplotní třídy H nebo F. Často používanou izolací je papírová fólie napuštěná nedotvrzenou pryskyřicí pod názvem Prepreg.

Izolační materiál je rozdělen do několika tříd, které se označují velkými písmeny a určují horní hranici teploty, kterou musí izolant snést. Pro názornost *Tab.2.[10][11]*



Obrázek 8: Ruční navíjení fóliového vinutí [16]

2.2.2 VN vinutí

VN vinutí je důležitou částí transformátoru, dokonce se uvádí, že je jeho srdcem. Uvádí se, že jde o technologicky nejkomplicovanější část výroby. Kvalita provedení jde ruku v ruce se spolehlivostí celého stroje. Každý výrobce upřednostňuje jiné konstrukční provedení. Mezi nejčastěji používané druhy VN vinutí patří:

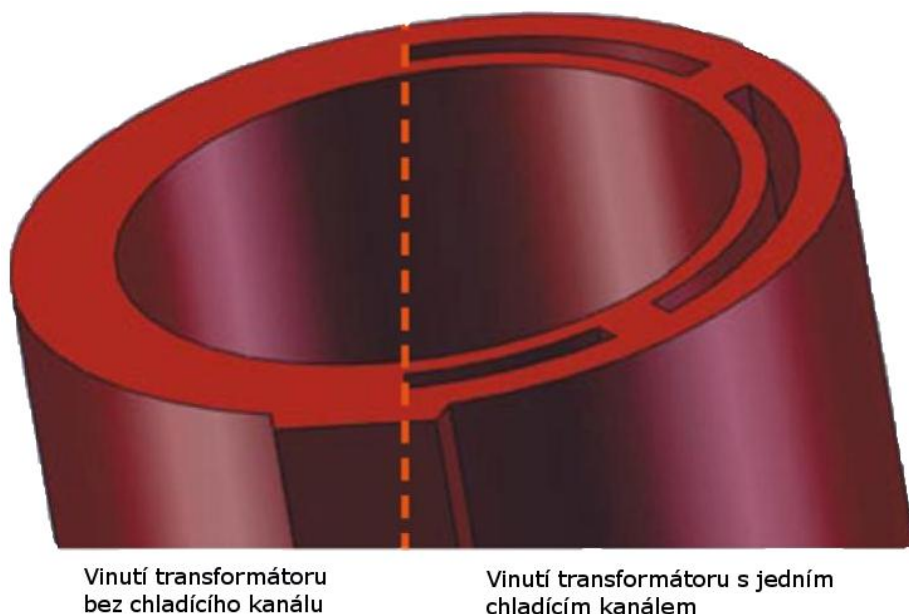
- *klasické vrstvé vinutí*
- *polohové vinutí*
- *vinutí z dílčích cívek z pásu*
- *vinutí z dílčích cívek z drátu*
- *sypané (náhodné) vinutí*
- *deskové vinutí*
- *diagonální vinutí*

Firma Trasfor [14] používá pro VN vinutí u svých transformátorů deskový způsob. Vinutí se skládá z několika disků (kotoučů), které jsou spojeny do série. Disky jsou navinuty z hliníkové pasoviny, která je nejčastěji silná 0,5 mm a 50 mm široká. Mezi jednotlivé vrstvy vinutí se vkládá mezizávitová izolace. Firma Trasfor používá jako izolaci polyesterové fólie tloušťky 0,03 mm. Tyto dvě složky jsou navíjeny na vysoce přesných

strojích a následně jsou jejich vývody svařené metodou TIG. TIG je mezinárodní zkratka pro označení metody svařování elektrickým obloukem za pomoci netavící se elektrody a ochranné atmosféry inertního plynu. Při této svařovací metodě hoří elektrický oblouk mezi netavící se elektrodou a svařovaným materiálem. Firma Trasfor uvádí, že tento druh vinutí zaručí ideální rozložení napětíového namáhání při provozu i při impulzním přepětí. U klasického vinutí mají vznikat kritická místa, ale u tohoto druhu se napětí ideálně rozdělí. Takto navinutá cívka je následně ve vakuu zalita epoxidovou pryskyřicí. Tato metoda by měla zaručit eliminaci vzduchových bublinek. Absence vzduchových bublin znemožní výskyt parciálních výbojů v transformátoru. Když pryskyřice dostatečně zatvrdne, dokončuje se proces výroby polymerací. Ta se provádí v peci.

Oproti tomu firma SGB [16] upřednostňuje dvouvrstvé vinutí z izolovaných měděných nebo hliníkových vodičů kruhového, či oválného tvaru, u kterých je primární izolace tvořena elektroizolačním polyesterovým lakem nebo Nomexem. Sekundárně se tato vinutí dále zalévají epoxidovou pryskyřicí. Aby byl eliminován výskyt vzduchových bublin, je potřeba vinutí zalévat pod vakuem, pomocí technologie VPI. Polyesterový lak má teplotní index 200 °C a Nomex 220 °C. Firma SGB vyrábí suché transformátory v teplotní třídě F (155 °C), z čehož vyplývá, že má primární izolace značnou tepelnou rezervu. U suchých transformátorů vyšších výkonu je problematický odvod tepla, firma SGB často praktikuje dodatečné chladicí kanálky umístěné dovnitř cívky - *Obr.9*. Tím je získána další plocha pro chlazení i rovnoměrné rozdělení teploty uvnitř cívky, což zvyšuje spolehlivost zařízení.

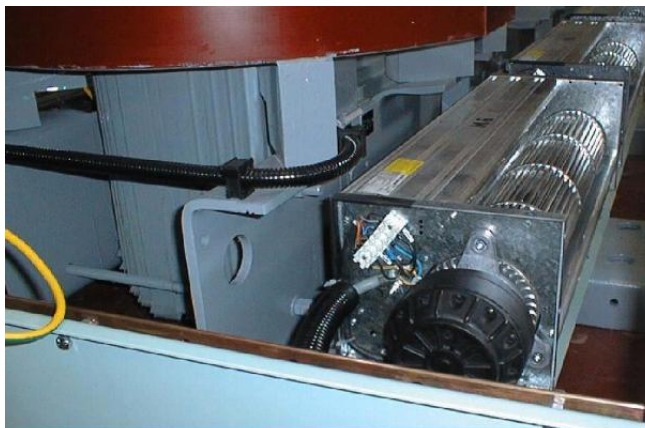
Ačkoli se může jevit, že jsou vodiče izolovány, protože jsou například zality v pryskyřici, jde pouze o pracovní izolaci, která nezaručuje nulový potenciál. Na tento aspekt je nutno myslet i při instalaci a dodržovat mezi zalitými cívkami a zemí stejné minimální vzdálenosti jako kdyby šlo o živé části. [7][11][13][14][15]



Obrázek 9:VN vinutí [7]

2.3 Příslušenství

Do kapitoly příslušenství lze zařadit například skříně, ve které je transformátor nainstalován, čidla kontrolující teplotu vinutí, či okolí a také přídavné ventilátory. Jak už bylo zmíněno v kapitole 2.2.2, tak suché zalévané transformátory nejsou sami od sebe chráněny proti doteku. Je tedy nutné zajistit ochranu proti náhodnému doteku. To lze praktikovat mechanickou překážkou, například mříží. Také je možné transformátor umístit do skříně. Skříně jsou konstruovány s různým stupněm krytí dle ČSN EN 60 529. Nejčastější je provedení IP 00, nebo IP 23 pro vnitřní prostory a IP 33 pro venkovní prostory. Při návrhu skříně je nezbytné uvědomit si, že je zapotřebí určité minimální množství cirkulovaného vzduchu pro správné chlazení transformátoru.



Radiální ventilátor



Axiální ventilátor

Obrázek 10: Možnosti provedení ventilátorů[14]

Suchý transformátor je klasicky chlazen AN – viz. kapitola 1.3.3. To je však možné snadno změnit přidáním ventilátorů – získáváme AF. Ventilátory mohou být umístěny buď radiálně nebo axiálně. Instalace a spuštění pomocných ventilátorů dokáže zvýšit výkon o 30 -40%, někteří výrobci dokonce uvádějí i více. Chod s takto zvýšeným výkonem by se neměl nijak závažně podílet na snížení životnosti. Jen při typu transformátoru s přidavnými ventilátory přibývá nutnost je pravidelně kontrolovat, jelikož se jedná o stroje točivé.[15][19]

2.4 Údržba suchých transformátorů

Nároky na údržbu suchých zalévaných transformátorů nejsou nijak vysoké. S potřebami olejových transformátorů, co se týče kontroly stavu oleje a následného čištění, nebo výměny za nový, se nedají srovnávat. Nicméně i zde je potřeba zařízení kontrolovat a provádět pravidelnou údržbu. V normálním prostředí se doporučuje provádět pravidelný servis alespoň jednou za rok. Mezi hlavní body zde patří vyčištění ploch vinutí od prachu a ostatních nečistot, které se provádí stlačeným vzduchem, popřípadě s použitím suchých hadrů, dále kontrola dotažení spojovacího materiálu, je-li transformátor instalován ve skříni, je potřeba zkontrolovat průchodnost ventilačních cest a správnou funkčnost ventilátorů. Následně je potřeba zkontrolovat nepoškozenost všech přítomných bezpečnostním ochran. Nakonec se může zkontrolovat celkový vzhled, je-li vše v pořádku. [11][20]

3 Porovnání suchého a olejového transformátoru

3.1 Rozdíly v konstrukci

3.1.1 Magnetický obvod

Magnetický obvod všech transformátorů ovlivňuje především hodnoty: ztráty naprázdno, hlučnost a proud naprázdno. Vzhledem k tomu, že dobré parametry těchto hodnot jsou velmi žádoucí, je nezbytné používat při výrobě kvalitní materiály a správné technologie.

Rozdíl mezi magnetickým obvodem suchého zalévaného transformátoru a olejového je technologicky nepodstatný, jelikož hlavní myšlenky a způsoby provedení zůstávají totožné. [7][8]

3.1.2 Vinutí

Samotný systém namotávání cívek je shodný u obou případů, kde záleží především na výrobci, jakou techniku zvolí, rozdíl nastává ve finální úpravě – zalévání vinutí. Je třeba zvolit vhodnou techniku i odpovídající materiály. Je třeba brát v potaz, aby zvolené materiály měly vyhovující provozní teplotu, dále tepelnou roztažnost a patřičné ostatní mechanické vlastnosti, například odolnost proti vibracím, dostatečný elektrický odpor, dlouhou životnost a další. Více o vinutí suchých transformátorů a materiálech používaných k jejich zalévání se nachází v kapitole 2.2.[16][21]

3.1.3 Chlazení

Nejspíše největším rozdílem mezi těmito stroji vůbec, je bezesporu přítomnost oleje, jakožto chladícího a izolačního média. Tato skutečnost od sebe jednotlivé druhy odlišuje a suchým transformátorům umožňuje umístění na místa, kde nesmí, či nemohou být instalovány olejové. Hlavním rozdílem je tedy přítomnost oleje, který stárne a degraduje, a je tedy nutnost pravidelné kontroly stavu a následných servisních opatření. Tento fakt je důležitou položkou v hospodárnosti. Navíc je na mnohých místech potřeba instalace bezpečnostních opatření.

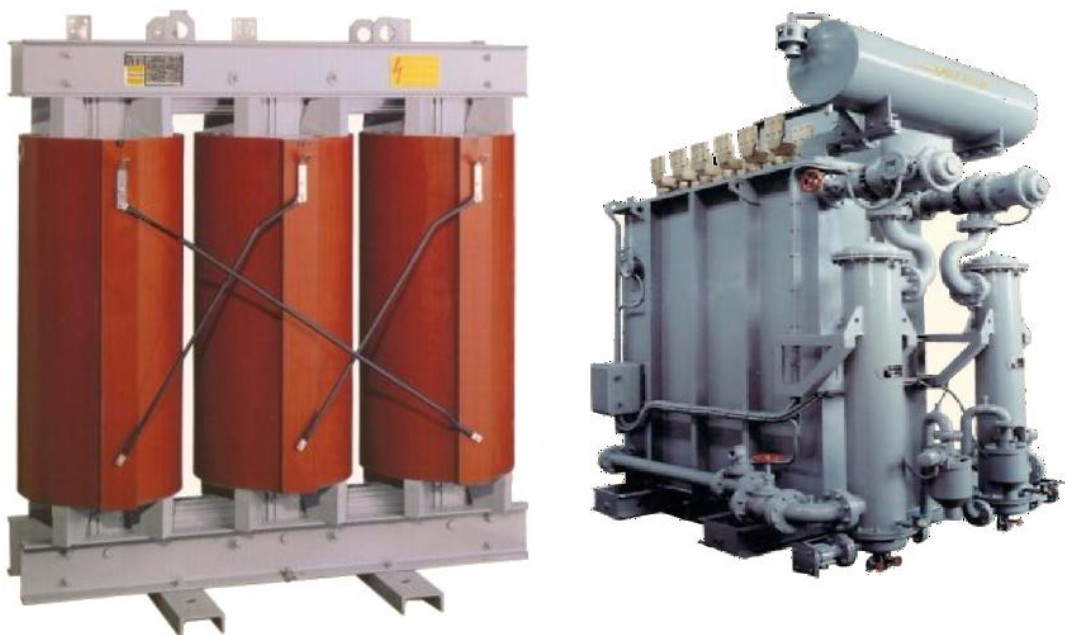
Oproti tomu u suchých zalévaných transformátorů je důležitá kvalita onoho zalévání vinutí. Je potřeba eliminace nehomogenit, kde by se následně mohly objevovat částečné výboje, které by časem snižovaly kvalitu vinutí. Je tedy zapotřebí vysoké technické vyspělosti výrobců.[13][17][19][20]

3.1.4 Obecně

Suché zalévané transformátory mají obecně větší rozměry při stejných výkonech, kvůli absenci oleje, jelikož je zapotřebí zachovat elektrickou pevnost mezi jednotlivými komponenty.

Jako další rozdíl lze uvést způsob zakrytování. Olejový transformátor je uzavřen v nádobě naplněné olejem a nelze si to tedy prohlédnout. Myšleno – spatřit magnetický obvod, cívky, atd. Suchý není nikterak chráněn, nepočítáme-li skříň, ve které může být instalován. Tento fakt může být rozhodující při pozorování poruch.

Dalším rozdílem je počet komponent. Pro názornost *Obr. 11*, na kterém jsou zobrazeny oba typy transformátorů a je zde názorně vidět, že olejový obsahuje mnohem více komponent a dá se tedy konstatovat, že je pravděpodobnější výskyt poruchy.[14][19][20]



Obrázek 11: Vlevo suchý, vpravo olejový transformátor[14]

3.2 Rozdíly ekonomické

3.2.1 Pořizovací náklady

Všeobecně je známo, že pořizovací investice je u suchých transformátorů mnohem vyšší, než u olejových. To ovšem není tak zcela pravda. Při rozhodování o koupi, je důležité zamyslet se nad tím, kde chceme daný transformátor instalovat. Na jaké místo a do jakého prostředí. Je možné, že bude zapotřebí, vybavit místo instalace zabezpečujícími prostředky. Mezi ně patří například: olejová jímka nebo vana, hasicí zařízení, ochrana proti výbuchu. Je tedy nutná finální pořizovací kalkulace, abychom dokázali říci, který typ je při nákupu výhodnější. Pořizovací náklady samotného suchého zalévaného transformátoru jsou mnohem vyšší, než u olejového.[14][19][20][21]

3.2.2 Provozní náklady

Zde je hlavním atributem olej. Jelikož je olej organická látka, degraduje. A to i u hermeticky uzavřených provedení. Jak olej stárne, pomalu se rozkládá a vznikají kyseliny, voda a pevné části. Tento olej už zdaleka nemá tak dobré vlastnosti, jako když byl nový. Hůře chladí, má horší izolační vlastnosti, může hůře chránit proti korozi. Tedy vše co od oleje vyžadujeme, má zhoršené vlastnosti. Takový stroj by dříve, či později dospěl k poruše. Proto je nutné olej pravidelně kontrolovat a zjišťovat jeho množství a stav - je možný i jeho částečný únik. Zjistí-li se, že je již olej nevyhovující, nastávají dvě možnosti. Buď je možné olej vyčistit nebo vypustit a vyměnit za nový. Obě tyto metody jsou velice finančně náročné. Náklady na údržbu suchých transformátorů nejsou nijak vysoké, viz. kapitola 2.4. Životnost obou typů je srovnatelná, u suchých transformátorů je rozhodujícím faktorem teplota prostředí.[14][19][20][21]

3.3 Rozdíly v možnosti instalace

Zde tkví hlavní přednost suchých zalévaných transformátorů. Své místo naleznou tam, kde je nevhodné, nebo dokonce zakázané používat olejový typ. Tato místa jsou určena hygienickými a požárními předpisy. Je to například v místech výskytu velkého množství obyvatel, tj. letiště, obchodní domy, nemocnice. Dále pro bezpečnost v metru, v dolech a z hygienického hlediska v místech s výskytem vodních zdrojů. Velmi se hodí do oblastí s vysokou vlhkostí vzduchu, nebo ve ztížených klimatických podmínkách jako je zasolené

prostředí, či tropické klima. Díky minimálním nárokům na údržbu, bezpečnost a spolehlivost se také hodí pro umístění na lodích. Tam se transformátor instaluje co možná nejnižší v trupu lodi, kvůli stabilitě, a je tedy vyžadována vysoká spolehlivost, jelikož je velmi pracné takto umístěný transformátor demontovat pro opravu.

Naopak olejové transformátory najdou své uplatnění ve venkovních prostorech, kde sahají teploty hluboko pod nulu. Klasické zalévané transformátory jsou konstruovány tak, aby bez problému zapínaly do -5°C . Je však možná pořídit i takový, který je konstruován pro start v -20°C , tato úprava je však na úkor ostatních vlastností. Dále je nutnost použití olejových pro napětí vyšší 35kV a pro výkony vyšší 25MVA.[14][19][21]

3.4 Provozní rozdíly

3.4.1 Normální stav

Suché transformátory mají výhodu, že lépe snáší krátkodobé přetížení na rozdíl od olejových. Tato výhoda vzniká díky mnohem nižší proudové hustotě, nežli má transformátor olejový. Také mají jinou tepelnou kapacitu, jinou nejvyšší povolenou teplotu systému a jiné. To je velká výhoda například pro špičkové zatížení, se kterým se můžeme setkat u větrných elektráren.

Suchý transformátor je odolnější dynamickým silám, které vznikají při průtoku zvýšeného proudu, například při zkratu. Výhoda hlavně díky fóliovému vinutí, o kterém je psáno v kapitole 2.2.1 .

Další výhodou suchých transformátorů je velmi snadné zvýšení výkonu přidáním nuceného chlazení – ventilátorů. O tomto tématu pojednává kapitola 2.3 .[14][19][20][21]

3.4.2 Při poruše

Poruchový stav transformátoru je velmi nepříjemnou událostí. Zvláště u distribučních, kde při nefunkčnosti vznikají velké praktické i finanční problémy. Dojde-li k požáru transformátoru, jeho průběh se velmi liší v závislosti jedná-li se o suchý nebo olejový. Suchý má zde výhodu. Nejenom, že už samotné vzplanutí je mnohem méně

pravděpodobné, díky použití špatně zápalných a samozhášivých materiálu, ale také samotný požár je snadněji uhasitelný a nevznikají při něm husté dýmy a nebezpečné zplodiny. Suché transformátory nenapomáhají v rozšiřování ohně, jako olejové. Dále požár olejových transformátorů mohou a často doprovází exploze. Statistiky hasičů vypovídají, že ročně v ČR vyjíždí jejich jednotky k více než stovce požárů transformátorů. [14][19][20][21]

Pro názorné shrnutí kapitoly 3 je vytvořena tabulka 3.

Vlastnost	Olejový transformátor	Suchý transformátor
Požární odolnost	malá	vysoká
Odolnost před mrazem	vysoká	malá
Odolnost před vysokými teplotami	nižší	vysoká
Odolnost proti agresivním vlivům	malá	vysoká
Chlazení	dobré	horší
Teplota jádra	nižší	vyšší
Hlučnost	vyšší	malá
Velikost	malé	větší

Tabulka 3: shrnutí porovnání vlastností suchého a olejového transformátoru[21]

Závěr

Předkládaná bakalářská práce pojednává o principu transformátoru, dále popisuje teorie transformátorů olejových, následuje popis suchých zalévaných a ve finální části je možné nalézt porovnání jednotlivých typů v kritériích konstrukce, ekonomiky, možnosti instalace a rozdílnosti při provozu.

Po přečtení bakalářské práce získá čtenář znalosti o konstrukci olejových transformátorů, u kterých je největší předností, ale zároveň i slabinou právě olej. Jelikož ve většině používaných transformátorů je použit minerální olej. Ten má výborné vlastnosti co se týče izolace a odvodu přebytečného tepla. Vyrábí se však z ropy, a tak je hořlavý a je velmi důležité zabránit jeho styku s životním prostředím. V posledních letech se dostávají ke slovu oleje rostlinného původu, jelikož při úniku a kontaminaci přírody nepředstavují takové riziko. Dále je důležité uvědomovat si, že oleje stárnou a degradují a je tedy potřeba olej pravidelně kontrolovat a při nedostatečné kvalitě olej vyčistit, či vyměnit. Tento problém u suchých transformátorů není. Dospěl jsem tedy k závěru, že olejový transformátor má své místo pro ekologicky nenáročné venkovní prostory s nutností velikých transformačních výkonů. Naopak nevhodný je pro uzavřené prostory s výskytem obyvatel, jako jsou například obchodní domy, školy a další. Je nutné jej instalovat mimo zmiňované objekty, což je nevhodné. Jeho pořizovací cena je nižší než u suchého, avšak je-li nutné místo instalace vybavit záchytnými jámami a dalšími bezpečnostními prvky, ceny se přibližují.

Oproti tomu suché transformátory mají svoji největší výhodu právě v absenci olejové náplně. Z toho vyplývají i jejich přednosti. Obecně lze říci, že se jedná o bezpečné transformátory, které jsou vyrobeny ze samozhášivých materiálů, při poruše nezatěžují životní prostředí, při kvalitním výrobním procesu mají vysokou spolehlivost, jsou velmi odolné vůči vlhkosti a agresivnímu prostředí. Jejich nepostradatelnou vlastností je právě ona bezpečnost. Jelikož neobsahují žádný olej, umísťují se do vnitřních prostorů s výskytem obyvatel a instalují se například v blízkém okolí zdroje pitné vody. Jejich další výhodou je jednoduchá a nenáročná montáž. Místo pro uložení transformátoru není potřeba nikterak upravovat. Mezi nejvýznamnější místa instalace suchých transformátorů patří větrné a vodní elektrárny, metra, letiště, velké zaoceánské lodě, ropné plošiny, školy,

nemocnice, hotely, banky, zkrátka všude tam, kde se využije jejich potenciál. Oba typy provedení, ať už suché, nebo olejové, mají své klady i zápory a záleží na uživateli, co od transformátoru vyžaduje.

Je důležité uvědomit si, že je při výrobě transformátorů nutné dále pokračovat ve vývoji a výzkumu starých i nových materiálů a technologických postupů, zejména v oblasti výzkumu rostlinných olejů. Jak je obecně známo, dostáváme se do globálního problému s nedostatkem ropy, a jak již práce zmiňuje, úniky oleje do přírody představují velký problém. Nabízí se však otázka, je-li moudré a prakticky proveditelné na polích pěstovat rostliny pro výrobu transformátorových olejů.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Majling Eduard, Transformátor, základní vlastnosti a dělení, O energetice.cz [online]. [Cit. 15. 2. 2016]. Dostupné z [www: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/transformator-zakladni-vlastnosti-a-deleni/>](http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/transformator-zakladni-vlastnosti-a-deleni/)
- [2] Koníček Václav, Elektrické stroje [online]. [Cit. 15. 2. 2017] 25s. Dostupné z [www: <http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/download/studium/vos/el-stroje-a-pristroje/transformatory.pdf>](http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/download/studium/vos/el-stroje-a-pristroje/transformatory.pdf)
- [3] PETROV, Georgij N. Elektrické stroje 1. Praha: Academia, 1980.
- [4] Bartoš, Václav. Teorie elektrických strojů. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 230 s. ISBN 80-7043-509-7.
- [5] GRUNDLAGEN DES TRANSFORMATORS. Elektrische Maschinen, Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik [online]. Dresden, 2001 [Cit. 17.2.2017]. Dostupné z: [<http://antriebstechnik.fh-stralsund.de/1024x768/Dokumentenframe/Kompendium/Transformator/Transformator.htm >](http://antriebstechnik.fh-stralsund.de/1024x768/Dokumentenframe/Kompendium/Transformator/Transformator.htm)
- [6] Mach Veleslav, Transformátorv [online]. [Cit. 21.3. 2017]. Dostupné z [www: <http://homen.vsb.cz/~mah30/pokrocily/html/6transformatory.html>](http://homen.vsb.cz/~mah30/pokrocily/html/6transformatory.html)
- [7] Mrajca Michal, Proč suché transformátory, Elektrotechnika v praxi, 2009 [online]. [Cit. 14. 4. 2017] 2s. Dostupné z [www: <http://www.sgbsk.sk/download/clanky-v-tlaci/proc-suche-transformatory.pdf>](http://www.sgbsk.sk/download/clanky-v-tlaci/proc-suche-transformatory.pdf)
- [8] ELPRO - ENERGO s.r.o., Řez suchým transformátorem [online]. [Cit. 2. 4. 2017]. Dostupné z: [<http://www.elpro-energo.cz/suche-transformatory/rez-suchym-transformatorem/>](http://www.elpro-energo.cz/suche-transformatory/rez-suchym-transformatorem/)
- [9] Leporelo, Transformátorový plech [online]. [Cit. 24. 4. 2017]. Dostupné z [www: <https://leporelo.info/elektrotechnicky-plech/ >](https://leporelo.info/elektrotechnicky-plech/)
- [10] Jan Knebl, Diplomová práce, Analýza poruch olejových transformátorů [online]. [Cit. 25. 4. 2017]. Dostupné z [www: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=100541>](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=100541)
- [11] Kraus Miroslav, Není transformátor jako transformátor. [online]. 2005 [cit. 29. 4. 2017]. Dostupné z [www: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26443>](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26443)
- [12] Euweb, Proč transformátor bzučí? [online]. [Cit. 29. 4. 2017]. Dostupné z [www: < http://www.transformator.euweb.cz/bzuceni.html>](http://www.transformator.euweb.cz/bzuceni.html)
- [13] MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN-technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [14] Trasfor, Který kam? [online]. [Cit. 10. 5. 2017]. Dostupné z [www: < http://docplayer.cz/6079952-Ktery-kam-transformator-s-vrstvovym-vinutim.html>](http://docplayer.cz/6079952-Ktery-kam-transformator-s-vrstvovym-vinutim.html)
- [15] Trasfor, Konstrukce suchých transformátorů [online]. [Cit. 10. 5. 2017]. Dostupné z [www: < http://docplayer.cz/5189873-Konstrukce-suchych-zalevanych-transformatoru.html>](http://docplayer.cz/5189873-Konstrukce-suchych-zalevanych-transformatoru.html)
- [16] ELPRO - ENERGO s.r.o., NÍZKONAPĚŤOVÉ VINUTÍ [online]. [cit. 16. 5. 2017]. Dostupné z: [<http://www.elpro-energo.cz/olejove-transformatory/nizkonapetove-vinuti/>](http://www.elpro-energo.cz/olejove-transformatory/nizkonapetove-vinuti/)
- [17] Pohonná technika.s.r.o., Třídy izolace, [online]. [cit. 19. 5. 2017]. Dostupné z: [<http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/asynchronni-motor/tridy-izolace>](http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/asynchronni-motor/tridy-izolace)

- [18] Martin, Slyš a poslouchej. [online]. [cit. 22. 5. 2017]. Dostupné z: <<http://www.kytara.net/hrajeme/slys-a-poslouchej?addpost&page=1>>
- [19] ELPRO - ENERGO s.r.o., Krytí [online]. [cit. 21. 5. 2017]. Dostupné z: <<http://www.elpro-energo.cz/suche-transformatory/kryti>>
- [20] ELPRO - ENERGO s.r.o., Návod k obsluze [online]. [Cit. 21. 5. 2017]. Dostupné z: <http://www.elpro-energo.cz/download/suche-transformatory/Navod_s_CZ.pdf>
- [21] HAMPL, Michal. Analýza poruch olejových transformátorů. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a telekomunikačních technologií. Katedra technologií a měření. [Cit. 23. 5. 2017]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=100541>
- [22] DVORSKÁ, Michaela, ELEKTRONICKÁ UČEBNICE [online]. [Cit. 28. 5. 2017]. Dostupné z: <<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/459>>
- [23] ELPRO - ENERGO s.r.o., Měření hluku u suchých a olejových transformátorů [online]. [Cit. 29. 5. 2017]. Dostupné z: <<http://www.elpro-energo.cz/download/mereni-hluku.pdf>>