

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Možnosti využití kapalin na bázi přírodních esterů ve  
výkonových transformátorech**



## **Anotace**

Předkládaná diplomová práce je rozdělená do tří bloků. První blok pojednává o obecném principu transformátoru a jeho jednotlivých funkčních podsystémech. Druhý blok se podrobněji zabývá problematikou izolačních systémů, kde jsou rozděleny a popsány jak suché tak i olejové transformátory. Cíl této práce je v posledním bloku, kde je věnována pozornost kapalinám na bázi přírodních esterů. Ty by mohly přinést inovaci do izolačního systému transformátorů.

## **Klíčová slova**

Transformátor, napětí, proud, výkon, magnetický obvod, elektrotechnické plechy, vinutí, izolační systém, suchý transformátor, olejový transformátor, FR3 kapalina, estery.

## **Abstract**

The introduced thesis is divided into three parts. The first part deals with the general principle of transformer and its particular operating subsystems. The second part deals with the issue of insulation systems in detail. In this part, dry and oil transformers are described and classified. The objective of the thesis is in the last part of the thesis, in which the issue of fluids based on natural esters is discussed. This issue could bring innovation to the insulation systems of transformers.

## **Key words**

Transformer, voltage, current, power, magnetic circuit, electrotechnical sheets of metal, winding, insulation system, dry transformer, oil transformer, FR3 liquid, esters.

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Radkovi Polanskému, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>1 SEZNÁMENÍ SE S TRANSFORMÁTOREM</b> .....	<b>11</b>
1.1 ROZDĚLENÍ TRANSFORMÁTORŮ .....	12
1.1.1 Podle počtu vodičů.....	12
1.1.2 Podle provedení magnetického obvodu.....	12
1.1.3 Podle způsobu chlazení.....	13
1.2 PRINCIP TRANSFORMÁTORU.....	13
1.3 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU.....	15
1.3.1 Transformátor naprázdno .....	17
1.3.2 Transformátor nakrátko.....	18
1.4 KONSTRUKCE TRANSFORMÁTORU .....	19
1.4.1 Magnetické obvody .....	19
1.4.2 Elektrotechnické plechy .....	21
1.4.3 Vinutí transformátoru .....	22
1.4.4 Ztráty v reálném transformátoru.....	24
1.5 TRANSFORMÁTORY PODLE POUŽITÍ .....	26
1.6 CHLAZENÍ TRANSFORMÁTORŮ.....	29
<b>2 VLASTNOSTI MATERIÁLŮ PRO KONSTRUKCI IZOLAČNÍHO SYSTÉMU</b> .....	<b>31</b>
2.1 SUCHÉ TRANSFORMÁTORY .....	31
2.1.1 Izolační laky.....	33
2.1.2 Fluorid sírový.....	34
2.1.3 Elektroizolační papír .....	35
2.1.4 Sušení a impregnace .....	37
2.1.5 Zalévané transformátory.....	38
2.2 OLEJOVÉ TRANSFORMÁTORY.....	40
2.2.1 Technologický postup při výrobě olejových transformátorů.....	41
2.2.2 Minerální oleje.....	43
2.2.3 Syntetické oleje.....	43
2.2.4 Rostlinné oleje.....	44
2.3 POROVNÁNÍ SUCHÝCH A OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ .....	47
<b>3 POUŽITÍ KAPALIN NA BÁZI PŘÍRODNÍCH ESTERŮ</b> .....	<b>48</b>
<b>ZÁVĚR:</b> .....	<b>52</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>53</b>

## Úvod

Aniž bychom si to uvědomovali, transformátory se staly součástí našeho každodenního života. Život bez nich je pro nás jen těžko představitelný, protože transformátory jsou nedílnou součástí rozvodu veškeré elektrické energie. Vzhledem k jejich celosvětovému četnému použití by si člověk mýsl, že technologie výroby za použití různorodých materiálů je již tak precizní, že není co vylepšovat. Opak je však pravdou, stále se objevují nové technologické postupy i nové materiály, které lze použít a tím je možno zvyšovat výkony, snižovat rozměry nebo váhu a hlavně snižovat ztráty a zvyšovat tím celkovou účinnost transformátorů.

Cílem první kapitoly této diplomové práce je obecné seznámení se s transformátorem jako strojem samotným. V dalších kapitolách je podrobně popsán izolační systém transformátoru, na který navazuje hlavní téma. Jedná se o použití kapalin na bázi přírodních esterů, seznámení se s touto variantou jako náhradou minerálních olejů a zdůraznění jejich výhod a nevýhod oproti jiným transformátorovým olejům.



## Seznam symbolů a zkratk

$N_1$	počet závitů na primární straně
$N_2$	počet závitů na sekundární straně
$U_1$	napětí na primární straně transformátoru
$U_2$	napětí na sekundární straně transformátoru
$U'_2$	svorkové napětí sekundární strany přepočtené na primární stranu
$U_i$	vnitřní indukované napětí, $U_i = U_{i1} = U_{i21}$
$U_K$	napětí nakrátko
$U_0$	napětí naprázdno
$I_1$	primární proud
$I_2$	sekundární proud
$I_{10}$	proud naprázdno
$I'_2$	sekundární proud přepočtený na primární stranu
$I_n$	jmenovitý proud
$f$	frekvence
$\Phi$	magnetický tok
$\Phi_\delta$	rozptylový magnetický tok
$\Phi_\mu$	vazební magnetický tok
$J$	proudová hustota
$R_1$	odpor vinutí napájecí cívky
$R'_2$	odpor vinutí sekundární cívky přepočtený na primární stranu
$R_{Fe}$	odpor zahrnující ztráty v železe
$X_\delta$	rozptylová reaktance
$X_{1\delta}$	rozptylová reaktance primárního vinutí
$X'_{2\delta}$	rozptylová reaktance sekundárního vinutí přepočtená na primární stranu
$X_{12}$	magnetizační reaktance
$Z$	impedance
$P_{FE}$	ztráty v železe
$P_{CU}$	ztráty v mědi
$P_0$	ztráty naprázdno
$P_K$	ztráty nakrátko při teplotě 75°C
$L_{PA}$	hladina akustického tlaku (1m)
$p$	převod transformátoru

S	průřez použitého drátu
Eo	elektrotechnické plechy válcované za studena s orientovanou strukturou
Ei	elektrotechnické plechy válcované za studena s neorientovanou strukturou
Et	elektrotechnické plechy válcované za tepla s neorientovanou strukturou
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí
kv	kilo-volt
pH	potential of hydrogen (potenciál vodíku)
UV	ultraviolet (ultrafialové)
ETV	environmental technology verification (ověřování ekologických technologií)
VPI	vacuum pressure impregnation (vakuově tlaková impregnace)
PCB	polychlorinated biphenyl

## 1 Seznámení se s transformátorem

Celý vývoj transformátorů začal postupným objevováním přírodních zákonů a jejich použitím při řešení elektrotechnických projektů. Když roku 1831 Michael Faraday objevil elektromagnetickou indukci, nejpravděpodobněji si v té chvíli neuvědomil, co všechno světu přinesl. Než se dostala elektrotechnika do podoby, jak ji známe dnes, prošla za dalších 150 let silným vývojem. [1]

Transformátor patří mezi základní elektrické netočivé stroje. Je tvořený magnetickým obvodem, vinutím a izolačním systémem. Transformátor dosahuje účinnosti kolem 95 %, ale dosažitelná účinnost může být až 99 %. Jeho hlavní funkcí je přenášet, tj. transformovat elektrickou energii pomocí elektromagnetické indukce za použití pevně daných pravidel. Nejčastěji se používá k přeměně elektrického střídavého napětí. Jeho dalším využitím je galvanické oddělení obvodů. Největší využití nacházejí transformátory v energetice pro hospodárný přenos elektrické energie z místa výroby až ke spotřebiteli pomocí vysokých a velmi vysokých napětí. Velké uplatnění však transformátor našel také v elektrotechnice, elektronice a také ve sdělovací technice. [2-5]



Obr. 1 Autotransformátor 400/121 kV – rozvodna Přeštice

## 1.1 Rozdělení transformátorů

V technické praxi se lze setkat s mnoha různými druhy transformátorů. To je důvodem nutnosti jejich klasifikace dle různých hledisek. Transformátory se vyrábí pro různá použití a pro různé výkony. Základním dělením transformátorů, se kterým se lze v odborné literatuře nejčastěji setkat, se ve stručnosti zabývají následující odstavce.

### 1.1.1 Podle počtu vodičů

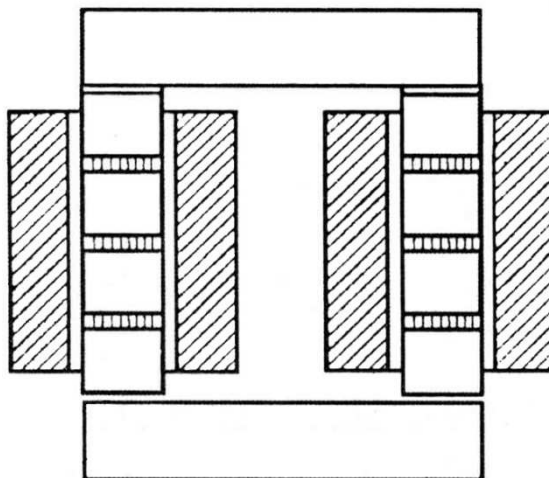
Podle počtu fází dělíme transformátory na:

- jednofázové,
- třífázové. [6, 7]

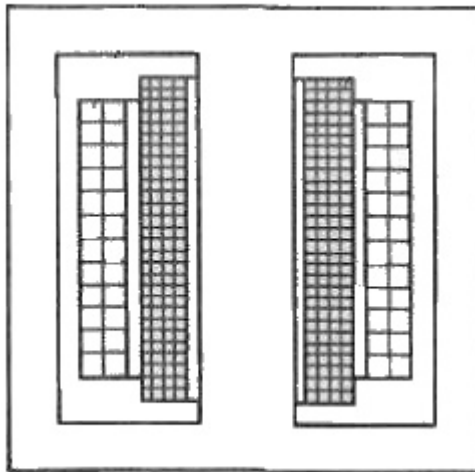
Jednofázové transformátory, se kterými se nejčastěji setkáváme, dosahují obvykle výkonu desítek až stovek wattů. Tyto transformátory nejčastěji transformují napětí z vyššího na nižší. Můžeme se setkat i s mnohem větším výkonem u jednofázových transformátorů. Jako náhradu třífázového transformátoru je možné použít tři jednofázové. Třífázové transformátory se používají nejčastěji převážně pro přenos a distribuci elektrické energie. Mohou dosahovat až stovek megawattů. [6, 7]

### 1.1.2 Podle provedení magnetického obvodu

Magnetické obvody můžeme dle jejich konstrukčního provedení rozdělit na jádrové a plášťové [7]. Viz Obr. 2 a 3.



Obr. 2 Jádrový transformátor (zdroj: [56])



Obr. 3 Plášťový transformátor (zdroj: [57])

U jádrového transformátoru (Obr. 2) magnetický obvod částečně zakrývá vinutí. Jinak tomu je u plášťového transformátoru (Obr. 3), kde sice narůstá hmotnost jádra, ale je zde dosaženo pevnější magnetické vazby. [7] Podrobněji je rozepsána tato problematika v kapitole 1.4.1 Magnetické obvody.

### 1.1.3 Podle způsobu chlazení

Chlazení transformátorů můžeme zařadit do dvou skupin:

- transformátory chlazené vzduchem,
- transformátory s olejovým chlazením.

U vzduchem chlazeného transformátoru se ztrátové teplo odvádí pomocí vzduchu. Ten může proudit přirozeně, nebo pro větší výkony pomocí větráků. U transformátorů s olejovou lázní se nejprve ztrátové teplo předá do oleje a teprve až potom do okolního prostředí. Podrobněji je tato problematika rozepsaná v kapitole 1.6. Chlazení transformátorů.

## 1.2 Princip transformátoru

Transformátor definujeme jako netočivý elektrický stroj, který pracuje na principu elektromagnetické indukce, jenž mění velikost střídavého napětí na jinou velikost střídavého napětí při stejném kmitočtu [5].

Nejprve si trochu přiblížme pojem elektromagnetická indukce. Pokud se v těsné blízkosti vodiče mění magnetické pole, např. pohybem magnetu, indukuje se ve vodiči napětí a v případě uzavřeného obvodu začne procházet vodičem proud. Velikost indukovaného napětí ve vodiči závisí na charakteru změn magnetického pole. U transformátoru nepoužíváme permanentní magnet, ale využíváme střídavý proud, kterým měníme směr magnetického toku v jádře transformátoru. [3]

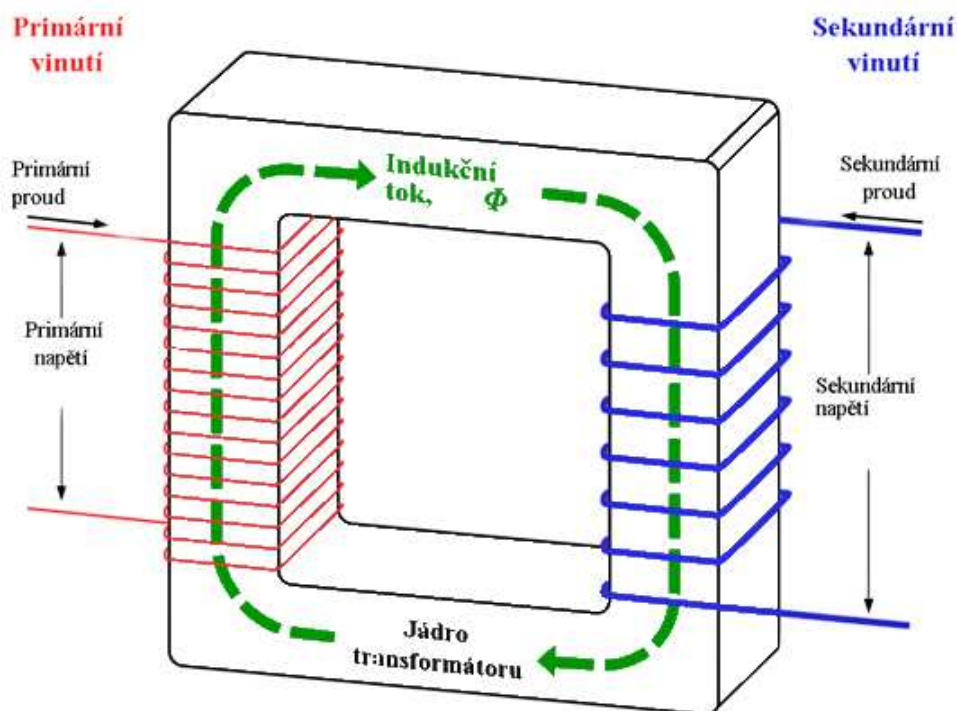
Pro představu o funkci transformátoru vycházejme z idealizovaného transformátoru (Obr. 4). Uvažujme uzavřený magnetický obvod, který je bezztrátový a má nekonečně velkou magnetickou vodivost. Primárním vinutím s počtem závitů  $N_1$  protéká primární střídavý proud  $I_p$ . Zde se přemění elektrická energie na magnetickou. V magnetickém obvodu je vytvořen magnetický indukční tok  $\Phi$  a na první cívce se indukuje napětí  $U_{i1}$ . [5, 7]

$$U_{i1} = 4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot \Phi \quad (1)$$

Indukční tok prochází sekundární cívkou s počtem závitů  $N_2$  a zde se indukuje podle Faradayova indukčního zákona napětí  $U_{i2}$  [5].

$$U_{i2} = 4,44 \cdot N_2 \cdot f \cdot \Phi \quad (2)$$

Tím dosáhneme výstupního napětí  $U_2$  a po připojení zátěže  $Z$  také výstupního proudu  $I_2$ . Při řešení střídavých obvodů nepoužíváme okamžité hodnoty veličin, ale je výhodnější použít jejich efektivní hodnoty. Transformátor pracuje pouze na střídavý elektrický nebo pulzující proud. U stejnosměrného proudu nedochází ke změně magnetického toku a tím se nám nic neindukuje na sekundární cívce. [5]



Obr. 4 Princip transformátoru (zdroj: [5])

Důležitým parametrem každého transformátoru je jeho převod. Ten je tvořen podílem vstupního a výstupního indukovaného napětí. [5, 7]

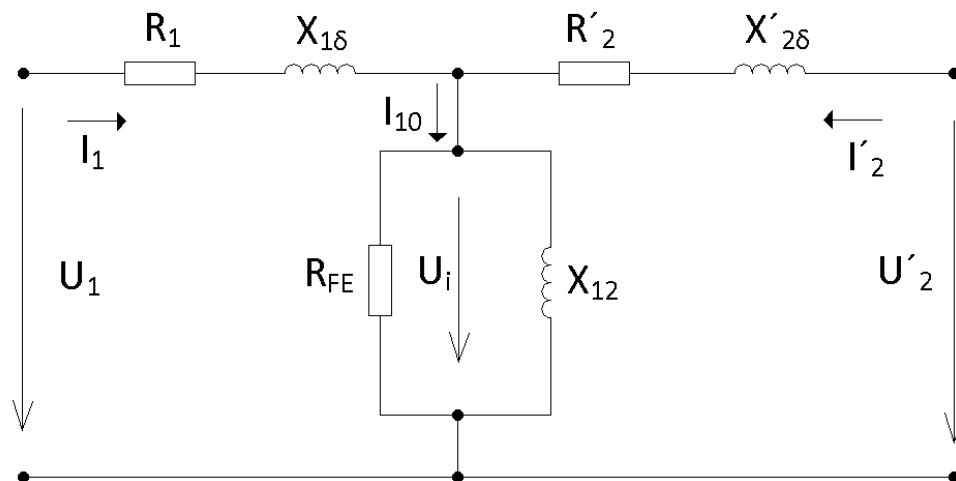
$$P = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3)$$

Ze vztahu je patrné, že poměr vstupního a výstupního napětí je dán poměrem počtu závitů primárního a sekundárního vinutí. Pokud je  $p > 1$  jedná se o transformátor snižující napětí, za předpokladu  $p < 1$ , bavíme se o transformátoru zvyšujícím napětí. Převod je možné vypočítat i ze vstupního a výstupního proudu transformátoru. [5, 7]

$$P = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4)$$

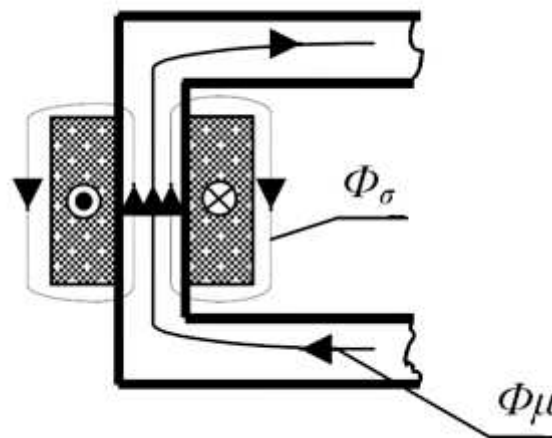
### 1.3 Náhradní schéma transformátoru

Náhradní schéma transformátoru (Obr. 5) je kombinací odporů a indukčností. Platí pro ustálený stav transformátoru a můžeme jej popsat pomocí algebraických rovnic při dodržování Kirchhoffových zákonů. Vyřešením rovnic dostaneme průběhy proudů ve schématu. [8]



Obr. 5 Úplné náhradní schéma transformátoru ve tvaru T-článku (zdroj: [6])

U skutečného transformátoru musíme při výpočtu zohlednit skutečnou vodivost, která má za následek vznik ztrát v železe, které se značí  $\Delta P_{FE}$ . V náhradním schématu jsou tyto ztráty značeny rezistivitou, která je tvořena z železných plechů zapojených paralelně k magnetizační reaktanci  $X_{\mu}$ . V náhradním schématu je nutné zohlednit rozptylovou reaktanci  $X_{\delta}$ . Část magnetického toku se uzavře kolem vlastní vinutí cívky (Obr. 6). K tomu dochází jak na primární straně vinutí tak i na straně sekundární. [7]



Obr. 6 Vznik rozptylových magnetických toků (zdroj: [7])

Veličiny na sekundární straně transformátoru se převedou na primární stranu. To znamená, že schéma platí pro transformátory s převodem jedna. Jedná se o univerzální schéma, které platí pro



všechny transformátory s libovolnými počty závitů na primární a sekundární straně. Za předpokladu, že nebude převod roven jedné, použijeme známé rovnice pro přepočítání. [7, 8]

$$U_2' = k \cdot U_2 \quad (5)$$

$$I_2' = \frac{1}{k} \cdot I_2 \quad (6)$$

$$Z_2' = k^2 \cdot Z_2 \quad (7)$$

Napěťové rovnice pro náhradní schéma jsou:

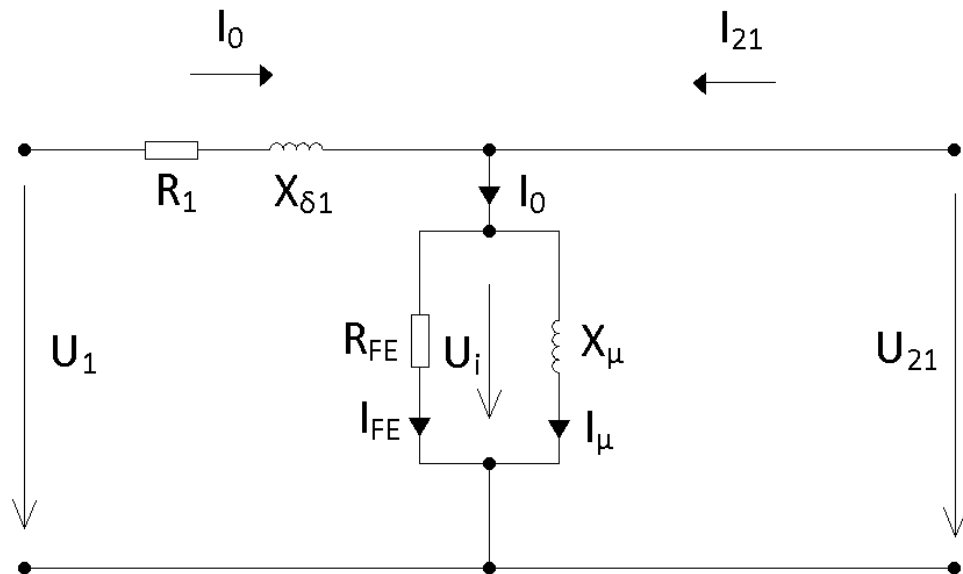
$$\overline{U}_1 = (R_1 + jX_1) \cdot \overline{I}_1 + jX_{12} \cdot \overline{I}_2 \quad (8)$$

$$\overline{U}_2 = jX_{12} \cdot \overline{I}_1 + (R_2 + jX_2) \cdot \overline{I}_2 \quad (9)$$

Pro určování podélných prvků použijeme stav nakrátko. V tomto stavu můžeme zanedbat příčný parametr. Pro určení příčných parametrů použijeme stav naprázdno, při kterém můžeme zanedbat podélné prvky. [9]

### 1.3.1 Transformátor naprázdno

Za předpokladu, že je transformátor napájen na primární straně, ale není na sekundární straně zatížen, mluvíme o stavu naprázdno (Obr. 7). V tomto stavu transformátor odebírá proud  $I_0$ . Vzhledem k tomu, že na sekundární straně není připojen, všechna energie, která se v něm přemění, jsou ztráty transformátoru naprázdno. Obvyklá hodnota se pohybuje v rozmezí 3 - 4 % jmenovitého proudu  $I_n$ . [7]



Obr. 7 Náhradní schéma transformátoru naprázdno (zdroj: [7])

Při stanovování ztrát u zapojení naprázdno, skládáme ztráty z Joulových ztrát a ztrát v železe. Joulovy ztráty můžeme v tomto případě zanedbat. Ztráty v železe rozdělíme na ztráty vířivými proudy a na hysterezní ztráty. [7] Více o ztrátách v transformátoru v kapitole 1.4.4 Ztráty v reálném transformátoru.

### 1.3.2 Transformátor nakrátko

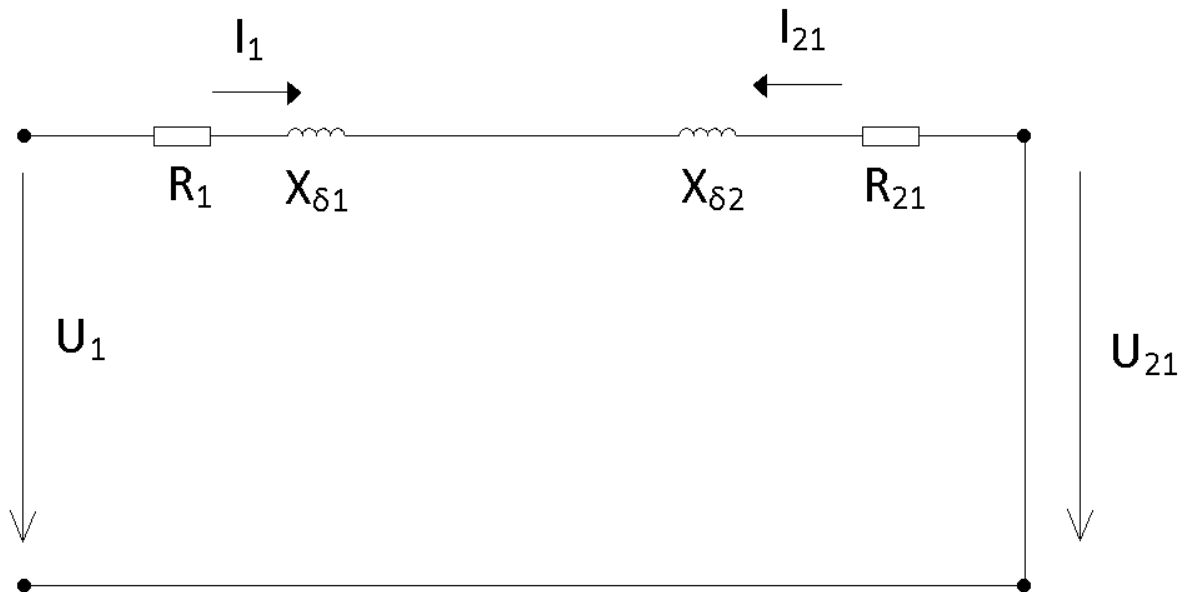
Transformátor ve stavu nakrátko si můžeme představit tak, že sekundární vinutí je zkratováno a na primární je připojeno jmenovité napětí (Obr. 8). Z toho vyplývá, že napětí  $U_2$  je rovno nule. Existují dva případy chodu nakrátko. [7]

Prvním případem je, když transformátor napájíme na primární straně jmenovitým napětím. Vzhledem ke zkratovanému sekundárnímu vinutí protéká vinutím transformátoru přibližně 25-ti násobek jmenovitého proudu. Vzhledem k velkému jmenovitému proudu se vinutí začne velmi rychle ohřívat až dojde ke zničení celého transformátoru, pokud nezapůsobí ochrany. [7]

Druhý případ je, když transformátor napájíme takzvaným napětím nakrátko. Napětí nakrátko definujeme jako napětí, při kterém vinutím protéká jmenovitý proud transformátoru. V tomto případě bude proud  $I_0$  velmi malý, protože sycení železa bude vzhledem k poklesu napětí velmi malé. Při spojení nakrátko vznikají pouze ztráty ve vinutí. Snížení Jouleových ztrát bychom docílili pomocí silnějších vodičů, ale máme jen omezenou velikost okénka v magnetickém obvodu transformátoru. V praxi se setkáme s procentním napětím nakrátko. [7]

$$u_k = \frac{U_k}{U_{ln}} \cdot 10^2 \quad (10)$$

U výkonových transformátorů se procentní napětí nakrátko pohybuje v rozmezí 3 - 6 %. [7]



Obr. 8 Náhradní schéma transformátoru nakrátko (zdroj: [7])

## 1.4 Konstrukce transformátoru

Konstrukce transformátoru zahrnuje navrhnutí jeho magnetického obvodu, vinutí a chlazení. Musejí se určit a spočítat jeho ztráty, napětí nakrátko, proud naprázdno, popřípadě další požadavky podle nároků na daný transformátor.

### 1.4.1 Magnetické obvody

Přes magnetický obvod, který je tvořen feromagnetickým materiálem se uzavírá magnetický tok. Veškeré návrhy transformátorů vychází z pevně stanovených fyzikálních principů a zákonů. Volba správného materiálu je velmi důležitá pro správné vlastnosti daného obvodu. [4, 10]

Mezi hlavní požadované vlastnosti magnetického materiálu patří:

- materiál musí být z magneticky měkkého materiálu,
- podle použití transformátoru musí být zvolen ideální tvar hysterezní křivky,
- docílení co největšího elektrického odporu,
- převážně u výkonových transformátorů je potřeba co největší povolené sycení,
- co nejvíce omezit velikost rozptylového magnetického toku použitím vhodného tvaru jádra (toroidní jádra). [4, 10]

Pro stavbu jádra se nejčastěji používají elektrotechnické plechy o tloušťce 0,5 mm a 0,35 mm s dobrými magnetickými vlastnostmi. Těch se nejlépe dosáhne u křemíkové oceli, kde je ocel legována křemíkem (< 3 %) a dalšími přísadami. Čím tenčí použijeme plechy, tím více zabráníme ztrátám vířivými proudy při určitém kmitočtu. Plechy mezi sebou musí být navzájem izolované, jako izolace může být použit lak nebo chemická vrstvička. Používají se dva druhy plechů – izotropní nebo anizotropní (orientované), které jsou výhodnější. Zde je možné válcováním ztotožnit orientaci plechů se směrem magnetické indukce. [4, 11]

Magnetický obvod dělíme na:

- jádro,
- pomocné jádro,
- spojku. [4, 11]

Je výhodné použít orientované plechy, abychom omezily magnetické ztráty. Po poskládání pásů na sebe je patrné, že nastane problém s nasazením vinutí, proto se jádro v určitých rovinách rozřeže a po nasazení jádra se vinutí zase spojí. Po rozřezání vzniknou otřepy, které je nutné odleptáním odstranit a mezi spáry se vloží tenké izolační fólie, aby nedošlo ke zkratování plechů. [11]

Pro velké výkony transformátorů je toto řešení nevhodné. V obvodu se vyskytují velké silové účinky, které vznikají například při zkratu. Na vinutí působí tah a tlak, a může být ještě namáháno na ohyb, což je nežádoucí, protože to může vést k deformaci vodičů. Abychom tomu zamezili, používají se jádra magnetického obvodu s kruhovým průřezem. Vzhledem ke skládání jádra z plechů je možné

se přiblížit kruhovému průřezu odstupňováním, při kterém jádro skládáme z různě širokých plechů. [11]

Je důležité si uvědomit, že pokud chceme transformátor dimenzovat na velké výkony, musí tomu odpovídat velikost jádra transformátoru. Pokud máme malé jádro, můžeme přenášet jen malé výkony, pro velké výkony potřebujeme velké jádro. U transformátorů a dalších spotřebičů na střídavý proud na rozdíl od stejnosměrných obvodů není průběh napětí a proudu v daném okamžiku shodný. Okamžitému napětí neodpovídá okamžitý proud v daném okamžiku a to má vliv na skutečný výkon, který je o něco menší. Vzhledem k tomu se jednotka střídavého proudu neoznačuje 1 W, ale 1 VA, což představuje zdánlivý výkon. [2]

## **1.4.2 Elektrotechnické plechy**

Pod pojmem elektrotechnické plechy je možné si představit plechy z elektrotechnické oceli, které jsou vyválcované do tenkých desek nebo pásků. Elektrotechnické plechy se používají pro snížení ztrát vířivými proudy. Tato problematika je více popsána v kapitole 1.4.4.3 Ztráty vířivými proudy. Nejčastěji se setkáme s plechy označovanými Eo a Ei. Jejich předchůdcem byly plechy označované Et, které měly od dnešních plechů odlišné magnetické i mechanické vlastnosti. [10]

Elektrotechnické plechy jsou vyrobeny z oceli s obsahem 1 - 4,5 % křemíku a s minimálním obsahem uhlíku. [12]

Správně navržené elektrotechnické plechy mají co největší plnění magnetického obvodu a co největší stálost magnetických vlastností. Toho docílíme velmi úzkou tolerancí tloušťek plechů se stálou velikostí tloušťky po celé délce plechu. S technologicky lépe zpracovanými plechy stoupá úměrně jejich cena. Ocel pro elektrotechnické plechy, užívané pro výrobu jader transformátorů a točivých strojů, musí mít charakteristické magnetické vlastnosti, ale současně také schopnost k technologickému zpracování. [10, 13]

### **1.4.2.1 Elektrotechnické plechy Et**

Elektrotechnické plechy označované jako Et sloužily hlavně pro výrobu motorů, proto také byly označovány jako plechy dynamové. I přesto se plechy používaly jako transformátorové, ale musela být splněná podmínka ztrátového čísla do 1,8 W/kg. Poslední u nás vyráběné plechy byly označovány jako 1,3 a 1,3s. Tyto plechy se vyráběly v tloušťkách 0,35 mm a 0,5 mm s obsahem křemíku od 2 do 4,5 %. Činitel plnění díky technologii dovalcovávání za studena vrostl z 92 % na 96 %. [10]

#### 1.4.2.2 Elektrotechnické plechy Eo

Elektrotechnické plechy, výrobcem označované jako Eo, jsou elektrotechnické plechy orientované, které se vyrábějí válcováním za studena. Tyto plechy, vzhledem k jejich orientaci krystalů, mají primární využití u transformátorů. U těchto plechů se zpracovává odpad z odřezků. Z něj se, po nařezání na správné délky, skládají jádra typu C. Tímto se zohospodární použití těchto plechů. Činitel plnění je v rozmezí 97 - 98 %. Tloušťka se pohybuje v rozmezí od 0,28 do 0,35 mm, ale setkáme se i s tloušťkou 0,5 mm. V zahraničí je možné sehnat plechy o tloušťce pouhých 25  $\mu\text{m}$ . [10]

#### 1.4.2.3 Elektrotechnické plechy Ei

Tyto plechy se nejčastěji používají pro asynchronní elektromotory, ale také pro výseky plechů pro malé transformátory. Také se používaly pro malé transformátory vzhledem k jejich tloušťce, která je 0,5 mm a 0,68 mm. Označení Ei znamená, že se jedná o plechy izotropní. Izotropní plech má stejné magnetické vlastnosti jak ve směru válcování, tak i ve směru k němu kolmém. U těchto plechů je velmi nízký obsah křemíku a to od 1 do 1,6 %. [10]

### 1.4.3 Vinutí transformátoru

Vinutí transformátoru je přenosovým médiem pro indukční tok, který je vyvolán magnetovacím proudem. Primární vinutí je připojené na zdroj energie a z něho je odebrán magnetovací proud. Indukované napětí vychází z Lenzova zákona [14]: *„Lenzův zákon je fyzikální zákon popisující vztah mezi elektrickým proudem a změnou magnetického indukčního toku“*.

Vedením magnetického proudu v primární cívce se vytvoří magnetický tok  $\Phi$ . Tento magnetický tok je následně veden přes jádro k sekundární cívce. Průřez vodičů musí být konstruován podle velikosti proudů, které budou vodičem procházet, aby se vinutí příliš nehřálo. Dále je zapotřebí použití hladkých vodičů a vyhnout se ostrým hranám. Vinutí musí být mechanicky a elektricky velmi pevné, aby vydrželo napěťové špičky. [5, 10, 14 - 16]

Vinutí transformátoru nejčastěji navijíme na cívkové tělísko (kostru), ale jsou případy, převážně u kruhových jader, kdy navijíme vodiče přímo na izolované jádro. Vinutí společně s jádrem nám umožní vytvořit požadovanou indukčnost, ale současně vzniknou i nežádoucí fyzikální jevy jako odpor vinutí, rozptylová indukčnost, dielektrické ztráty a podobně. Nejčastěji se pro vinutí transformátorů používají vodiče z měkké mědi lakované polyuretanovým lakem. U cívek, u nichž hrozí, že se při

navíjení bude izolace mechanicky odírat, je zapotřebí použít zesílené izolace. U vodičů je průrazné napětí přes 3 kV. Tato hodnota se měří při zvýšené teplotě. Při použití vodičů s větším průměrem dosáhneme až hodnoty 4 kV. Tyto vodiče se používají hlavně u transformátorů, kde je velké mezizávitové napětí. [10, 17]

Nejčastěji se u vícefázových vinutí používá třífázové, které se obvykle zapojuje na straně nízkého napětí do:

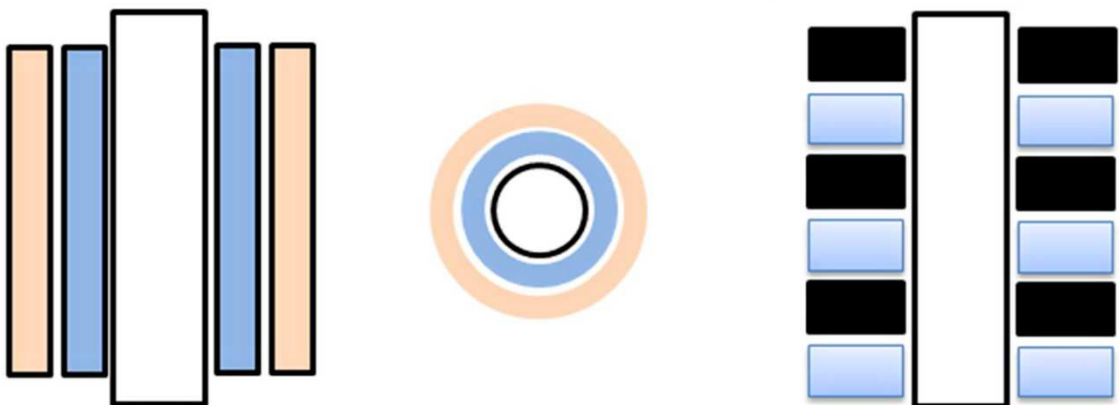
- hvězdy y,
- trojúhelníka d,
- lomené hvězdy z.

Na straně vysokého napětí do:

- hvězdy Y,
- trojúhelníka D.

Volba typu vinutí se volí podle použití daného transformátoru. [16]

Nejčastěji se volí jedno ze dvou základních vinutí. Jedná se o vinutí sousá a vinutí prostřídaná viz Obr. 9.



Obr. 9 a) - sousé vinutí (pohled z boku), b) - sousé vinutí (pohled shora), c) - prostřídané vinutí (pohled z boku) (zdroj: [18])

Obě vinutí si jsou velmi podobná, ale hlavním rozdílem je, že u sousého vinutí se na jeden válec navijí pouze jedno vinutí a u prostřídáního vinutí se na jeden válec navijí střídavě vinutí nízkonapěťové a vysokonapěťové. Při samotném navíjení je možno navíjet buď rovnou na navíjecí válec nebo na válec, který je tvořený z lepenky a jsou na něm distanční lišty. Distanční lišty jsou tvořeny z lepenky, která je nastříhaná na požadované rozměry. Distanční lišty mají dvoje využití, jednak slouží jako vymežovací podložky, které jsou vloženy mezi vinutí, a také vymežují prostor, kde může volně proudit vzduch a tím odvádí ztrátové teplo ven z transformátoru. [18]

Při navíjení vodiče je možné použít i svazkové vodiče. Na začátku navíjení se nejprve ohnou a zabandážují vývody a teprve poté začne samotné navíjení. Při něm je nutné vše pečlivě sledovat a také kontrolovat, zda-li je vinutí pořádně utaženo. Hlavně u transformátorů velkých výkonů se pravidelně srazí vinutí k sobě gumovou paličkou. Tím se zabrání, aby se vinutí nerozcházel. V případě vinutí svazkových vodičů se musí pravidelně prostřídát pořadí vodičů. Jinak by hrozila možnost vzniku vyrovnávacích proudů a zvyšovaly by se ztráty. [18]

Po dokončení vinutí se celý válec sundá a za pomoci hydraulického lisu je slisován. Dalším krokem je zabandážování celého vinutí, aby nemělo tendenci se uvolňovat. Nakonec se vinutí vysuší a připraví se k nasazení nebo může být ještě upraveno impregnačním olejem či zalitím pryskyřicí. [18]

#### **1.4.4 Ztráty v reálném transformátoru**

U reálného transformátoru musíme počítat se ztrátami, které jsou způsobené:

- nenulovými ohmickými odpory primárního a sekundárního vinutí (ztráty v mědi),
- rozptylem magnetického toku, reálný činitel vazby mezi vinutím transformátoru je menší než 1 ( $k < 1$ ),
- vířivými proudy – proudy indukovanými v jádru cívky,
- hysterezními ztrátami. [4]

##### **1.4.4.1 Ztráty zapříčiněné nenulovými odpory primárního a sekundárního vinutí (ztráty v mědi)**

Tyto ztráty vznikají průchodem proudu přes vinutí. Zde má vinutí odpor, který nutí konstruktéry, aby zvětšovali průřezy vodičů. Z následujícího vztahu je patrné, že ztráty v mědi jsou úměrné velikosti proudu, který přes ně v danou chvíli protéká. [4]



$$P_{Cu} = R_1 \cdot (I_{1ef})^2 + R_2 \cdot (I_{2ef})^2 \quad (11)$$

$R_1$  a  $R_2$  = odpory vinutí primární a sekundární cívky

$I_{1ef}$  a  $I_{2ef}$  = efektivní hodnoty primárního a sekundárního proudu

Abychom předešli ohřevu vinutí, musíme dodržovat doporučovanou proudovou hustotu  $J$ :

$$J = \frac{I_{ef}}{S} \quad (12)$$

velké síťové transformátory	1,5 A/mm <sup>2</sup>
malé síťové transformátory	až 3,5 A/mm <sup>2</sup>
toroidní transformátory	2 - 5 A/mm <sup>2</sup>
malá hrníčková jádra	až 4,5 A/mm <sup>2</sup>

Tab. 1 Doporučené proudové hustoty (zdroj: [4])

#### 1.4.4.2 Ztráty vyplývající z rozptylu magnetického toku

U reálného transformátoru není magnetický tok soustředěn jenom do magnetického obvodu, ale jeho část se uzavírá vzduchem. To se projevuje tím, že činitel vazby je  $k < 1$ . Zpravidla to je  $k > 0,98$ . [4]

Velikost rozptylové indukčnosti transformátoru je závislá na několika parametrech:

- rozměry jádra,
- tvar jádra,
- uspořádání vinutí,
- materiál jádra. [4]

Abychom snížili co nejvíce rozptylový magnetický tok, musíme předejít ostrým hranám ve směru magnetického toku na jádře. Ideální je použít toroidní jádro. Dále je vhodné použít jádro s velkým poměrem  $S / l$  (průřez / délka střední siločáry). V neposlední řadě je potřeba zvolit jádro s co největší

permeabilitou v poměru jádro / okolí. Důležité je dodržovat jedno základní pravidlo a to, že nejprve vineme primární vinutí a až nakonec vinutí ze silných vodičů. Tím snížíme velikost izolačního napětí. [4]

### **1.4.4.3 Ztráty vířivými proudy**

Vezmeme-li elektricky vodivé jádro, je možné si ho představit jako nekonečné množství závitů tenkého drátu. Působením proměnného magnetického pole v rovinách kolmých na směr magnetického toku se v těchto smyčkách indukují vířivé proudy. Tyto vířivé proudy mají dvojí účinek:

- ohřívají části jádra, kterými protékají (Jouleovo teplo:  $P = R \cdot I^2$ ),
- podle Lenzova zákona zmenšují původní magnetický tok. [4]

### **1.4.4.4 Hysterezní ztráty v transformátoru**

Jádro transformátoru několikrát za sekundu mění směr magnetického toku a tím vznikají hysterezní ztráty. Čím je frekvence přemagnetizování vyšší, tím vzrůstají i ztráty v jádře. Pro snížení hysterezních ztrát se používají tzv. měkké magnetické materiály. To jsou materiály s úzkou hysterezní křivkou. [4]

## **1.5 Transformátory podle použití**

Podle použití lze transformátory rozdělit na mnoho skupin. Od transformátorů energetických, přístrojových, galvanických, svařovacích přes pecové a autotransformátory až po usměrňovací transformátory.

### **Energetické transformátory**

Tyto transformátory dělíme podle dalších kritérií na transformátory blokové, spojovací, průmyslové, distribuční, transformátory vlastní spotřeby a izolační. [54]

### **Blokové transformátory**

Tyto transformátory jsou nejčastěji zapojeny v sériovém řazení s alternátorem. Je používán pouze pokud napětí na alternátoru je menší než aktuální odběr z elektrárny. Používá se k transformaci na danou napěťovou úroveň. Konstrukce bývá převážně tvořena formou jednofázových nebo třífázových vinutí. [54]

### **Transformátory spojovací**

Jak název napovídá, používají se ke spojení dvou různých sítí o různých napěťových hladinách. Při přechodu napěťové úrovně VVN na napěťovou úroveň VN se používá transformátor třífázový. [54]

### **Přístrojové transformátory**

Přístrojové transformátory se nazývají ty, které slouží pro napájení měřících a jistících přístrojů. Přístrojové transformátory plní dvě funkce. Buď oddělují obvody měřících nebo jistících přístrojů od obvodů vysokého napětí, nebo slouží k transformaci napětí a proudů na potřebné hodnoty měřících přístrojů. [54]

Přístrojové transformátory dělíme na:

- měřící transformátory - u nich je hlavním předpokladem, že budou dosahovat vysoké přesnosti v okolí jmenovitých hodnot,
- jistící transformátory - zde je požadavkem, aby dosahovaly vysoké přesnosti již při nízkých napětích.

Další dělení přístrojových transformátorů je podle transformované veličiny:

- transformátory proudu - zde je primární vinutí tvořeno pouze jedním závitem, který je sériově zapojen s měřeným obvodem, na vinutí sekundární se pak připojí jistící a měřící přístroje,
- transformátory napětí - zde je primární vinutí připojeno k obvodu paralelně a na vinutí sekundární strany jsou připojeny jistící a měřící přístroje. [54]

### **Galvanické transformátory**

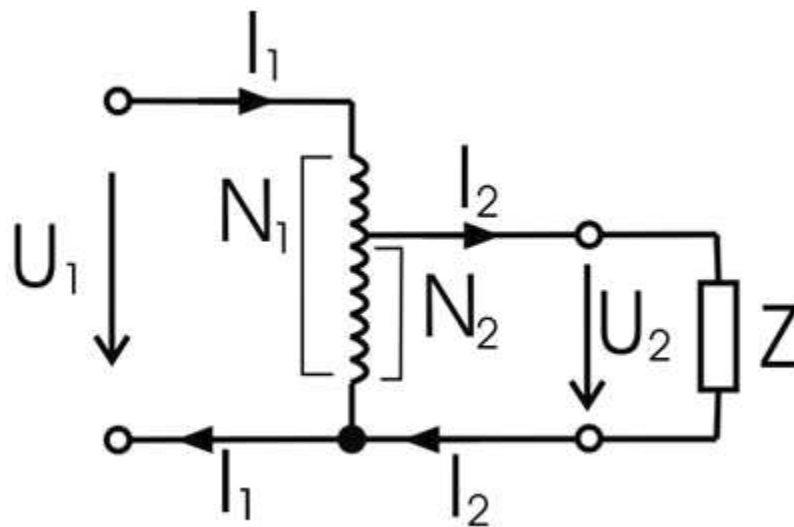
Používá se tzv. transformátorová vazba, kde se používá transformátor s převodem jedna. Galvanické transformátory nemění vstupní veličinu na výstupní, ale jejich úkolem je oddělit výrobní zdroje od venkovního vedení a tím zabránit případným atmosférickým přepětím. [19]

### **Autotransformátory**

Autotransformátory jsou transformátory se společnou primární a sekundární cívkou. To znamená, že transformátor má pouze jedno vinutí s odbočkou a spotřebič vzhledem k tomu není galvanicky oddělen od uživatelské sítě. O vnitřním zapojení můžeme říct, že společným vinutím autotransformátoru prochází proud  $I_1 - I_2$  (Obr.10). Odbočku na sekundárním vinutí lze realizovat pomocí jezce a jeho posunem na patřičnou mez lze pak regulovat výstupní napětí. Pro přesnou

regulaci je potřeba udělat robustní jádro s větším počtem závitů, aby jezdec plynule nastavil požadovanou hodnotu. Je zapotřebí dodržet podmínku, aby zkratový proud nebyl příliš velký. V opačném případě by byla namáhána izolace vodiče. Zkratový proud omezíme vhodným použitím uhlíkových sběračů. Autotransformátory se nejčastěji používají v laboratořích pro nastavení patřičného střídavého napětí. Velké zastoupení mají také v dopravě pro řízení trakčních vozidel, kde se využívá velká výhoda autotransformátoru, kterou je jeho menší typová velikost a nižší hmotnost. [5, 10]

Autotransformátory dimenzované pro malé výkony jsou obvykle vinuty na toroidní jádra. Ta mohou být izolována ovinutím do izolační fólie, nebo jsou vložena do plastových pouzder. [10]



Obr. 10 Schéma autotransformátoru (zdroj: [5])

### Svařovací transformátory

Jak název napovídá, používají se k obloukovému svařování. Nejčastěji se jedná o jednofázové svařovací transformátory. Svařovací proud je možno řídit v rozmezí od 20 do 700 A. [54]

Při odporovém svařování je použit transformátor s výstupní hodnotou napětí do 10 V a s proudem přesahujícím velikost až 100 kA. Sekundární vinutí je tvořeno jediným závitem, který díky velkému výkonu je nutné chladit – nejčastěji se používá jako chladicí médium voda. [54]

### Pecové transformátory

Používají se v systému napájení pecí na tepelné zpracování kovů. Nejznámějším typem je oblouková elektrická pec, kde je pec vyhřívána elektrickým obloukem. Elektrický oblouk prochází a zároveň ohřívá daný materiál. Tím se tyto pece odlišují od indukčních, kde je k ohřevu zapotřebí sekundární indukovaný proud. Teplota v těchto pecích může dosahovat teplot kolem 1800 °C. K zapojení pecového transformátoru je zapotřebí použít snižující transformátor, který nemá výstupní

jmenovité napětí větší než 500 až 600 V. Výstupní jmenovitý proud dosahuje až několik stovek kA a výkon může dosahovat tisíců kVA. Tyto transformátory pracují ve stavech od plného zatížení až po druhou mez, kdy pracují naprázdno. Při chodu nakrátko je možné do obvodu primárního vinutí zapojit tlumivky. [20]

### **Tlumivky**

Tlumivky jsou známy také pod názvem elektromagnetický transformátor a proto je pro úplnost vhodné se o nich také zmínit. Tlumivka je namotaná cívka do tvaru válce, která se používá k blokování signálů na určité frekvenci v obvodu. Po průchodu proudu přes tlumivku se v okolí tlumivky vytvoří magnetické pole. Použití tlumivky má za následek zvýšení indukční reaktance v obvodu. [21, 22]

Tlumivky dělíme podle daných kritérií na:

- zhášecí,
- předřazené,
- vyhlazovací,
- komutační,
- spouštěcí,
- kompenzační. [21, 22]

## **1.6 Chlazení transformátorů**

Cílem každého návrháře je postavit transformátor, který bude mít bezpečný a dlouhodobý provoz. Jedním z mnoha hlavních vlivů na spolehlivost a samozřejmě i dlouhodobou životnost je chlazení. [23]

V transformátorech, stejně jako v točivých elektrických strojích, vznikají ztráty. Ty můžeme rozdělit na ztráty naprázdno, kde se jedná o ztráty v železe a na ztráty nakrátko, kde se jedná hlavně o Joulovy ztráty. Díky těmto ztrátám dochází k oteplování částí transformátoru. Abychom transformátor udrželi ve stanovených mezích, je nutné transformátor správně chladit. [11]

V následujících tabulkách nalezneme různá chladicí média, jejich označení (Tab. 2) a možné způsoby oběhu chladiva (Tab. 3).

Druh chladicího média	Značka
vzduch	A
plyn	G
voda	W
olej (bod vzplanutí do 300°C)	O
jiná kapalina (bod vzplanutí nad 300°C)	K
nehořlavá kapalina	L
pevný izolant	S

Tab. 2 Značky pro chladicí média (zdroj: [11])

Způsob oběhu chladiva	Značka
přirozený	N
nucený (s ventilátorem)	F
nucený s usměrněným prouděním	D

Tab. 3 Značky pro způsob oběhu (zdroj: [11])

Každý transformátor se více nebo méně zahřívá. To je dáno jeho konstrukcí, požadovaným výkonem a aktuálním zatížením. V případě transformátorů, které jsou dimenzovány na menší výkony, tedy do 200 kVA, se používá chlazení vzduchem. Pokud bychom chtěli vzduchem chlazený transformátor až do výkonu 1000 kVA, musíme použít izolaci třídy H. To znamená, že maximální provozní teplota izolace je do 180 °C. Čím použijeme vyšší třídu izolace, tím zvýšíme životnost, provozní teplotu apod. [2, 11]

Vzduchem chlazené transformátory řadíme do skupiny tzv. suchých transformátorů. Do této kategorie ještě zapadají transformátory zalévané v různých pryskyřicích. Ty mají oproti ostatním výhodu, že jsou odolnější proti mechanickému poškození a hořlavému prostředí. [11]

Velmi často se však používají transformátory olejové, kde celé jádro i s vinutím ponoříme do nádoby s olejovou lázní. Podle umístění dělicí roviny se může jednat o nádobu vanového nebo zvonového typu. Olej zde plní funkci chlazení, ale zároveň i izoluje. Vzhledem ke ztrátám v železe dochází k ohřevu oleje, který je nutné chladit. Pro malé výkony, řádově desítky kVA, stačí hladká nádoba, kde olej cirkuluje pomocí termosifonového jevu. Pro výkony přes 1000 kVA je nutné použít lepší systém chlazení. Toho docílíme např. vytvářením žeber na nádobě, nebo umístěním chladících radiátorů. [11]

Nádoby transformátorů dimenzované pro velké výkony bývají vybaveny radiátory, které mohou být ochlazovány pomocí ventilátorů. V případě hladkých nádob je možné pomocí čerpadla chladit olej přes externí radiátorovou baterii. Tímto způsobem můžeme dosáhnout výkonů přesahujících desítky MVA. [11]

## **2 Vlastnosti materiálů pro konstrukci izolačního systému**

Izolační systém je jedním z důležitých rysů transformátoru, který vyžaduje velkou pozornost. Stanoví se jím jeho konstrukce, izolační médium a celková fyzická velikost transformátoru. Izolační systém určují následující kritéria:

- dielektrické požadavky,
- tepelné požadavky,
- požadavky životního prostředí,
- mechanické vlastnosti,
- technologické vlastnosti,
- cena. [24, 25]

Dielektrické požadavky jsou založeny na zdrojovém napětí, na které bude transformátor připojen. Pro transformátory jsou podle normy definovány pouze 3 třídy: 105 °C, 120 °C a 155 °C, kde použití závisí na okolní teplotě. Problémem izolačních materiálů je, že postupem času ztrácejí charakteristické vlastnosti, které jsou rozhodujícím faktorem pro určení životnosti. Postupem času dochází ke změnám elektrických i mechanických vlastností zařízení. Životnost papírové izolace úzce souvisí s ostatními konstrukčními prvky. Olej, který obtéká papírovou izolaci, je nutné ošetřovat a regenerovat. Papírová izolace absorbuje olej, tím se vzájemně znehodnocují jednotlivé prvky, čímž napomáhá k jejich rychlejšímu stárnutí. [24, 25]

Lze využít dvě metody posuzování stupně stárnutí transformátorů. První metoda se nazývá off-line. Jedná se o zkoušky prováděné při odstavení transformátoru z provozu. Druhá metoda je známa pod názvem on-line. Tato metoda se zabývá prováděním nepřetržitého měření během provozu. Průzkum ukázal, že až 80 % poruch transformátorů má na svědomí porucha izolace. [24, 25]

### **2.1 Suché transformátory**

Za suchý transformátor můžeme považovat takový, ve kterém obklopuje vinutí transformátoru plyn nebo pryskyřice. Každý transformátor může být konstruovaný jako suchý, čímž je zapříčiněna zvyšující se poptávka českých zákazníků po tomto produktu. Jejich vývoj jde tak rychle kupředu, že se dnes používají i tam, kde dříve bylo jedinou možností použít olejový transformátor. Moderní suché

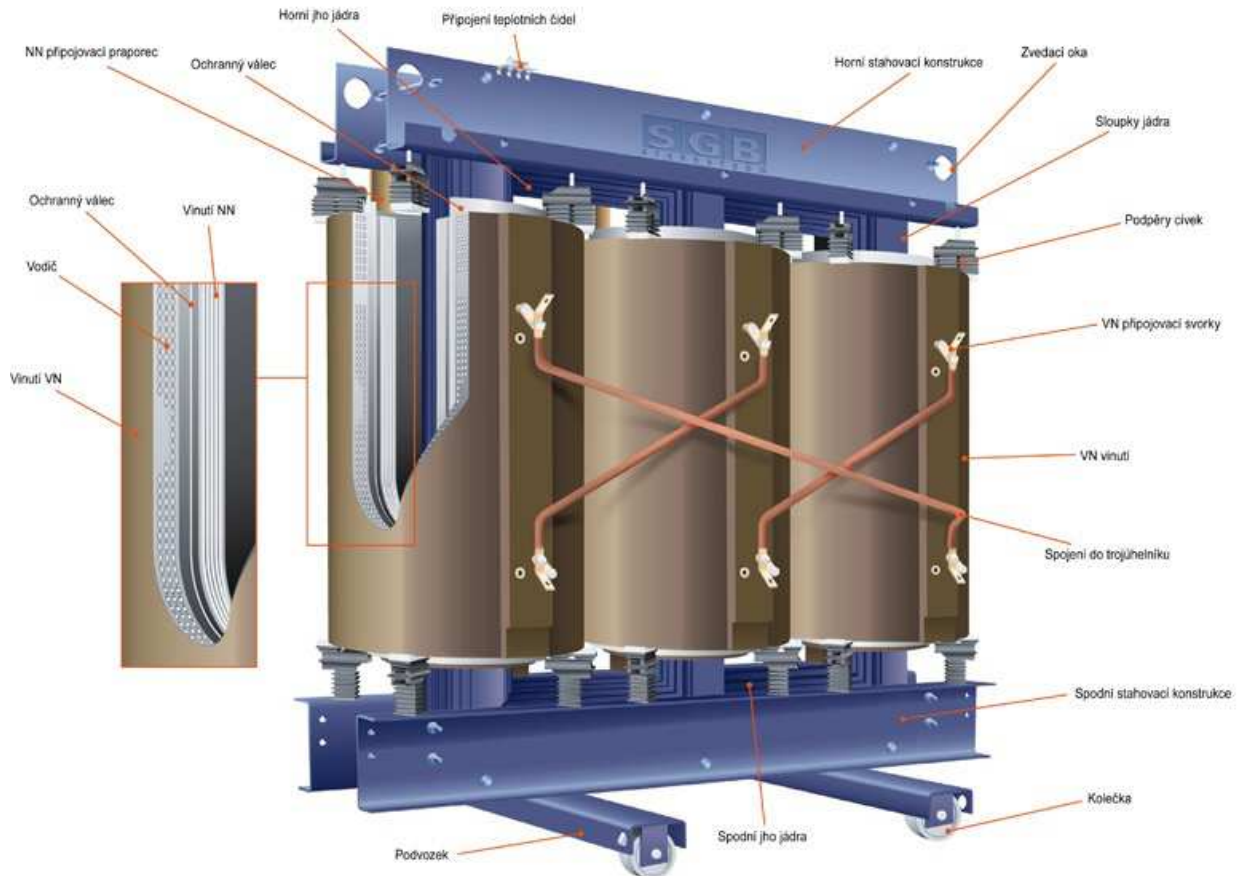
transformátory od společnosti SGB-SK mohou dosahovat výkonů až do 25 MVA a napětí do 35 kV. Základní principy suchých transformátorů se neliší od těch, se kterými se setkáváme u olejových transformátorů. Jejich instalace je mnohem jednodušší, vzhledem k tomu, že není nutné budovat záchytné jímky ani další prostředky spojené s případným únikem oleje. Suché transformátory mají oproti olejovým transformátorům velkou výhodu, jsou lehčí a nehořlavé. V případě vzniku požáru nevznikají žádné nebezpečné zplodiny. Postupně se zvyšující zkušenosti s teplotním chováním materiálů dnes umožňují konstruovat transformátory s efektivnějším odvodem tepla. Izolační materiály vinutí dnes jen neizolují jednotlivé části, ale také chrání proti vlhkosti, prachu či koroznímu prostředí. Při používání plynu místo oleje odpadá nutnost vybudovávat záchytné jámy nebo vany. U suchých transformátorů jde poměrně snadno nárazově zvýšit výkon až o 40 %, což se využije u větrných elektráren, kde se nemusíme bát, že danými špičkami transformátor zničíme. Srdcem každého suchého transformátoru je jeho vysokonapěťové vinutí, které je celé zalité do pryskyřice. Jako nejběžnější izolace pro vysokonapěťové vinutí se dnes používá smaltovaný povlak na vodiči. Nízkonapěťové pásy mohou být holé s papírovou izolací mezi vrstvami. Používání papírového obalu na popruhu vodiče se pomalu nahradilo syntetickými nebo polymerními nátěry. Suché transformátory podléhají v běžném provozu, ale dokonce i během transportu, silnému teplotnímu namáhání, proto je jejich důležitou vlastností, aby dokázaly odolat rázovému zvýšení teploty. V tomto ohledu je rozhodující správné složení pryskyřice. [24, 26, 27]

V současné době se používá epoxidová pryskyřice se skelnými vlákny, která se zalévá pod vakuem pro eliminaci vzduchových bublinek. To vede k více jak dvojnásobnému zpevnění izolace. [24]

Suché transformátory jsou používány především pro vnitřní použití, aby se minimalizovalo nebezpečí požáru. U těchto transformátorů se běžně používá papírová izolace Nomex, která by měla vydržet teplotu 220 °C. Počáteční náklady u suchých transformátorů mohou být o 60 až 70 % vyšší než u olejem chlazených transformátorů. [27]

S rychlým rozvojem digitálních počítačů jsou návrháři osvobozeni od rutinních výpočtů. Počítače jsou široce používány pro optimalizaci designu transformátoru. V řádu několika málo minut dnes počítače mohou zpracovat několik vzorů a přijít s optimálním designem. [24, 26, 27]





Obr. 11 řez transformátorem [převzato z 39]

### 2.1.1 Izolační laky

Izolační laky, známé též pod názvem elektroizolační laky, se používají k lakování (odizolování) drátů. Jedná se o roztoky polymerů, nejčastěji o směsi kresolových rozpouštědel. Laky jsou nanášeny na speciálních linkách a jsou vytvrzovány při teplotách od 300 do 600 °C. Při těchto vysokých teplotách je zaručeno, že se rozpouštědla vypaří a katalyticky se spálí. Při pájení izolovaného drátu dochází k uvolňování malého množství vysoce jedovatých plynů. To je nutné brát v potaz na pracovištích, kde dochází k pájení. Je nutné zde mít instalované účinné odsávací zařízení. Pro dosažení perfektní souměrné celistvosti se celý proces nanášení opakuje šestkrát až dvacetkrát. Udává se, že celých 10 % hmotnosti lakovaného drátu tvoří právě izolace. [18, 28, 29]

Izolační syntetické laky bychom rozdělili do tří nejčastěji používaných skupin. V České republice jsou známy pod názvy Isobal S1901, Isobal S1903 a Isobal S1942. [18, 28, 29]

Isobal S1901 je syntetický izolační lak, který je složen z alkydové a alkyfenolické pryskyřice. Jeho hlavním využitím je impregnace vinutí. Aplikace probíhá pomocí vakuové impregnace nebo jen

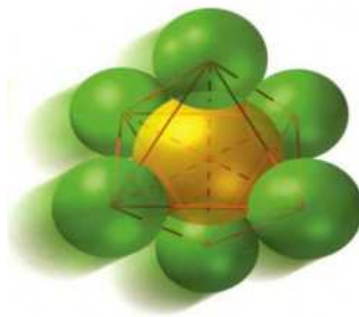
namáčením. Má světlehnědou nebo transparentní barvu. Má dobrou odolnost proti vodě a vlhku, je odolný proti chemickým výparům a také proti zahřátému transformátorovému oleji. [18, 28, 29]

Isobal S1903 spadá do teplotní třídy F (155 °C). Jedná se také o syntetický izolační lak složený z epoxyesterové a melaminoformaldehydové pryskyřice. Má transparentní barvu. Aplikuje se máčením. Slouží nejen k impregnaci vinutí, ale lze ho také použít i k impregnování magnetického obvodu transformátoru. [18, 28, 29]

Isobal S1942 je syntetický lak složený z roztoku alkydové a alkyfenolické pryskyřice. Má transparentní barvu a používá se kromě impregnace vinutí a i na impregnaci magnetického obvodu transformátoru. Aplikujeme ho máčením nebo pomocí vakuové impregnace. [18, 28, 29]

### 2.1.2 Fluorid sírový

Fluorid sírový je značen chemickým vzorcem  $SF_6$ . Jeho struktura je tvořena osmibokou geometrií. Uprostřed je jeden atom síry a okolo se nachází 6 atomů fluoridu. [30-32]



Obr. 12 *Struktura  $SF_6$*  [převzato z 32]

Tento plyn objevili roku 1901 Henri Moissan a Paul Lebeau. Jedná se o velmi kvalitní dielektrický plyn, který se používá převážně ve vysokonapěťových aplikacích, jako dielektrikum a zhasací medium. Uplatnění najde i ve slévárenství a v oblasti medicíny. Tento plyn se používá díky své nehořlavosti a vysoké hustotě také jako inertní náplň izolací při zasklívání oken a také se využívá k plnění pneumatik závodních vozů. Tento plyn je anorganický, bezbarvý, bez zápachu, netoxický, nekorozivní, nehořlavý a zůstává v plynné fázi i při velmi nízkých teplotách. Teplota varu je na  $-63,8$  °C. Jeho transport se provádí obvykle v tlakových lahvích. Tento plyn je těžší než vzduch, a proto je velmi nebezpečný v uzavřených prostorách (výkopy, sklepy, šachty). Bohužel obrovskou nevýhodou tohoto plynu je neblahý dopad na životní prostředí. Fluorid sírový je tzv. skleníkový plyn. Jeho molekuly mají schopnost absorbovat infračervené záření, které uniká ze zemského povrchu a tím dochází ke globálnímu oteplování naší planety. Při srovnání s oxidem uhličitým, který je považován za velký

problém dnešní doby, fluorid sírový přispívá až 22 200x více k tvorbě skleníkových plynů. Proto byl zařazen mezi kontrolované látky podle Kyotského protokolu. [30-32]

Fluorid sírový se obvykle rozděluje do 3 stupňů podle jeho kvality:

- elektrický stupeň: používaný jako dielektrický plyn,
- elektronický stupeň: používaný jako leptadlo (čínidlo) u plazmových procesů,
- metalurgický stupeň: použití ve slévárenství při slévání hliníku a hořčíku jako komponent interního plynu. Při kombinaci s dusíkem se používá jako čistící látka při výrobě hliníku a jeho sloučenin. [30-32]

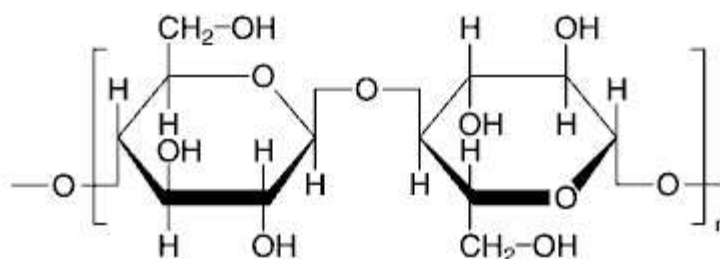
Dielektrická pevnost plynu SF<sub>6</sub> je lineární funkcí, čím vyšší je tlak, tím vyšší je dielektrická pevnost. [32]

### 2.1.3 Elektroizolační papír

Elektroizolační papír se vyrábí z buničiny, která je vedlejším produktem při zpracování štěpek dřeva. Nejčastěji se používají jehličnaté stromy, jako jsou smrk a jedle. Základní složkou buničiny je celulóza. [18]

#### 2.1.3.1 Výroba celulózy

Termínem celulóza se chybně a velmi často označuje papírenský polotovár, který je pouze směsí celulózy. Celulóza je polysacharid, který se skládá z beta-glukózy, což je látka známá více pod názvem hroznový cukr. Její sumární vzorec je [C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>]<sub>n</sub>. Jednotlivé glukóзовé elementy tvoří velmi dlouhé nerozvětvené řetězové struktury o cca 500 jednotkách, které jsou nerozpustné ve vodě. [33-35]



Obr. 13 Vzorec celulózy [převzato z 60]

Celulóza je celosvětově nejrozšířenějším biopolymerem. Ročně ji vzniká až  $1,5 \times 10^9$  tun. Kromě průmyslové výroby se vyskytuje i u některých pláštěncových živočichů. Význam celulózy v přírodě je velmi významný. Většina známých živočichů nemá enzymy, které by dokázaly rozštěpit spojení mezi vazbami, které drží jednotlivé elementy celulózy. Výjimkou je hlemýžď zahradní či různé bakterie. Celulóza je pro komerční účely izolována ze dřeva. Celulóza má široké použití, její vlákno se používá hojně v papírenském a textilním průmyslu. Nitrací celulózy vzniká nitrocelulóza, známá také jako střelná bavlna. [33-35]

Výroba celulózy závisí na kvalitě použitých surovin, zejména na dřevěných vláknech stromů. Je znatelný rozdíl ve výsledné pevnosti při použití vlákna z měkkého dřeva ze Skandinávie, které má delší vlákna nebo při použití tvrdého dřeva. Výroba celulózy by se dala stručně popsat v několika následujících krocích:

- vlákninové dřevo (smrk, borovice, osika ...),
- odkornění (zbavení kůry),
- strouhání kmenů (mechanický proces),
- vaření,
- praní,
- třídění,
- bělení,
- sušení / papírenský stroj. [33-35]

Používají se tři druhy celulózy:

- mechanická,
- chemická,
- recyklovaná. [33]

### ***2.1.3.1.1 Mechanická celulóza***

Z názvu mechanická celulóza je patrné, že se vlákna získávají mechanickou cestou pomocí brusného rotačního kamene. Tuto metodu můžeme zefektivnit použitím vyššího tlaku, teploty nebo za použití chemikálií. Výhodou je vynikající výtěžnost, která dosahuje 90 %. Nevýhodou je nažloutlost

papíru. Pro použití v transformátorech je větším problémem jeho nízká pevnost, proto se ke své nízké životnosti používá jako papír na noviny, letáky, prodejní katalogy a další produkty. [33-35]

### **2.1.3.1.2 Chemická celulóza**

Vlákna získáváme chemickou cestou, kdy štěpky jsou vařeny s různými chemikáliemi. Cílem této metody je zbavit obsah hlavně smoly ale i všech ostatních nečistot, tím docílíme větší pevnosti papíru. Nejčastěji se při výrobě používá sulfátový proces výroby, při kterém se používá zásadité prostředí. Výhodou této metody výroby je kromě odolnosti proti žloutnutí hlavně vynikající mechanická pevnost. Na druhou stranu vzniká mnoho odpadu, který musí být likvidován. [33-35]

### **2.1.3.1.3 Recyklovaná celulóza**

Vlákna se v této metodě získávají pomocí sběrného papíru. Tato metoda není příliš dokonalá, protože po rozvláknění není technologicky možné zbavit vlákna všech nečistot a tiskařské barvy. Existují ovšem produkty, u nichž to nevedí. Při recyklování se nedá použít jen starý materiál, je potřeba přidat i nová vlákna, ale úspora na dřevě je v tomto směru znatelná. [33-35]

## **2.1.4 Sušení a impregnace**

V konstrukci izolačního systému transformátorů jsou důležité pojmy sušení a impregnace, a proto vyžadují maximální pozornost. Olej, papír a lepenková izolace musí být pro získání optimálních izolačních vlastností zbaveny nečistot, prachu a vlhkosti. [26]

Celulózová izolace používaná při výrobě transformátorů a reaktorů má vlhkosti při pokojové teplotě 8 až 10 %. Pro izolační systémy transformátoru je voda škodlivá, protože snižuje dielektrickou pevnost, odpor oleje a urychlí stárnutí a následnou ztrátu mechanických vlastností pevné izolace. Ke snížení pevnosti impulsním napětím dochází, jakmile je obsah vlhkosti papíru větší než 0,1 %. Papír s obsahem vlhkosti 1,5 % stárne desetkrát rychleji než papír pouze s 0,3 %. [26]

Správné zpracování eliminuje všechny nečistoty a cizí částice v transformátoru, např. prach, špínu, jemné kovové částice a vlákna různého původu. Jakékoliv nečistoty a částice, které zůstávají v transformátoru po vakuovém sušení, se odvádí do transformátorového oleje při oběhu, kde jsou zachyceny olejovým filtrem. Optimální využití vynikajících vlastností olejo-celulózových dielektrických systémů závisí na efektivním sušení, odplynění a impregnačním procesu. [26]

#### **2.1.4.1 Základní principy sušení**

Celulózová izolace se suší při splnění dané podmínky - tlak vodních par kolem izolace je menší, než je v izolaci. Teplota je nastavena na maximální přípustnou teplotu sušení, tj. asi 110 °C. Účinnost sušení také závisí na tom, jaký difúzní koeficient má izolační materiál. Tento koeficient je závislý na materiálu, teplotě, tlaku a vlhkosti. Zahřátí na danou teplotu zvyšuje difúzní koeficient a snižuje dobu sušení na polovinu. [26]

Doba schnutí a doba sušení izolace se výrazně zvyšuje s velikostí transformátoru. Doba sušení závisí na konečné vlhkosti. [26]

Obsah vlhkosti v celulózové izolaci může být snížen vlivem proudění horkého vzduchu. Jádru a vinutí je umístěno ve speciální nádrži. Sušení se provádí buď ve vakuové nádobě, nebo v sušárně s prouděním cirkulovaného vzduchu. [26]

Pro sušení ve vlastní nádobě je jádro s vinutím vloženo společně do sušárny. Kryt nádrže je umístěn v horní poloze a všechny vstupy jsou uzavřeny. [26]

Při vakuovém sušení je transformátor při vysokém podtlaku v nádobě vytápěn z počátku na 100 °C po dobu 24 hodin. Vakuum je v přímé úměře s lepším a rychlejším sušením. Za účelem udržení teploty transformátoru na požadované hodnotě je tlak zvýšen na atmosférickou úroveň v prvních několika dnech sušení. Během sušení ve vakuu je vlhkost z okolního prostředí sbírána pomocí čerpadla. [26]

#### **2.1.5 Zalévané transformátory**

Je několik důvodů, proč používat suché zalévané transformátory. Jedná se o bezpečné transformátory, které příliš nezatěžují životní prostředí, jsou odolné vůči vlhkosti a mají dobrou mechanickou odolnost. Nejvíce se využívají ve vnitřních instalacích. Materiály používané v transformátoru jsou různé pryskyřice, které jsou v případě požáru samozhášecí a mají nízké náklady na montáž. Protože není zapotřebí budovat olejovou jímku a další náležitosti související se zásadami bezpečného používání transformátorů, jsou zalévané transformátory v dnešní době hodně používané. Jako zalévací médium se používá syntetická pryskyřice, která je výborný izolant. Používané syntetické pryskyřice mají velmi dobrou přilnavost k ostatním materiálům. Po zalití jádra dojde k vytvrzení v krátké době a hned po vytvrzení získává dobrou odolnost proti tepelným, chemickým a mechanickým útokům. [18, 36]

Používané syntetické pryskyřice se dělí na jednosložkové nebo dvousložkové. S jednosložkovou pryskyřicí se můžeme v odborných textech setkat jako s práškovou. Jednosložková pryskyřice je vlastně předpřipravená prášková směs, která by měla splňovat dané charakteristické vlastnosti. Pryskyřice dosahuje potřebných vlastností za použití různých tvrdidel. Vlastnosti obou druhů pryskyřic jsou takřka srovnatelné, jediným rozdílem je, že práškové pryskyřice mají mnohem menší elektrickou pevnost. [18, 36]

Dvousložkové pryskyřice se vyrábí epoxidové nebo popřípadě polyuretanové. Tyto pryskyřice se řadí do teplotní třídy Y (90 °C) až H (180 °C). Zde se můžeme setkat s různým typem vytvrzování, buď za klasické pokojové teploty, nebo za použití zvýšené teploty pomocí k tomu určených pecí. Podle použitého materiálu a formy vytvrzení se dělí na tvrdé, středně pružné a ohebné. Dvousložkovou pryskyřici používáme buď s aditivy, nebo bez nich. Podle použití plniva mění pryskyřice tvar, barvu a také charakteristické vlastnosti. Dobrým příkladem je, že při použití správného plniva dochází v případě požáru k jeho samozhášení. Bez použití plniv má pryskyřice nízkou viskozitu. Plniva sice zhoršují viskozitu, ale na druhou stranu omezují smrštitost a zvyšují odolnost proti vysokým teplotám. [18, 36]

Jsou jen dvě možnosti jakou variantou vyrobit zalévaný transformátor. Jedná se o možnosti Resin-Rich nebo VPI, kde každá metoda má své klady i zápory. Nelze jednoznačně říci která z metod je lepší, protože se využívají obě zhruba stejně. [18, 36]

### **2.1.5.1 Metoda Resin-Rich**

Její výhodou je jednoduché vytvrzování přípravků a poměrně snadná rozebíratelnost takto izolovaných vinutí, což vede k tomu, že je možné je v případě potřeby opravovat. Naopak nevýhodou je vznik strukturálních nehomogenit, k čemuž u VPI metody nedochází. [18, 36, 55]

Tento systém je založen na tříložkovém kompozitu za použití předimpregnovaného materiálu. Použitím této metody se vytvoří na vinutí kompaktní izolační trubka o určité šířce stěny. Takto ošetřené a připravené vinutí se instaluje do transformátoru. [18]

Jak bylo naznačeno, jedná se o tříložkový materiál. Základní částí je skleněná tkanina buď s rovnými, nebo stáčenými vlákny o tloušťce 0,12 mm a 0,14 mm. Je výhodnější používat tkaninu s rovnými vlákny, sice mají stejné mechanické vlastnosti jako v případě stáčených vláken, ale disponují mnohem lepší elektrickou pevností. Jako izolační médium se používá kalcinovaný papír pro svoje typické vlastnosti. Má větší pevnost a také je mnohem hutnější nežli jiné izolační papíry. Pojivem, které drží obě složky pohromadě je reaktoplastická epoxidová pryskyřice. [18]

Podle parametrů daného vinutí se navine potřebná vrstva daného tříslložkového kompozitu. Na vinutí se navijí izolační materiál nejčastěji ve formě pásky o šířce 20 mm s překrytím, které může být dvoutřetinové, poloviční nebo jen třetinové. K vytvrzení takto připraveného vinutí dochází za určité teploty ve speciálních pecích. Teploty v pecích se pohybují v rozmezí teplot od 160 do 180 °C. Doba vytvrzování závisí na tloušťce izolačního materiálu, ale obvykle se pohybuje okolo jedné hodiny. V posledním kroku je nutné izolaci postupně chladit, což je nutné provádět velmi opatrně a pozvolna. Při prudkém chlazení má izolace tendenci praskat a tím ztrácí své izolační schopnosti. [18]

### **2.1.5.2 Metoda VPI**

Jedná se o metodu za použití vakuově tlakové impregnace. U VPI sice nevznikají strukturální nehomogenity jako v předchozím systému, ale jeho stinnou stránkou je zde poněkud vyšší cena vytvrzovacího zařízení a také nemožnost případného rozebrání takto izolovaných předmětů. [18]

Základem metody VPI je systém složený ze skleněné tkaniny, polyesterového rouna nebo polyimidové fólie a impregnantu. Impregnant musí být kompatibilní s pojivem, aby nedošlo k jeho znehodnocení. Velice důležitou očekávanou vlastností je dobrá savost materiálů, ta se využije hlavně při použití více vrstev. Zde je potřeba dobře proimpregnovat všechny vrstvy, aby bylo docíleno požadovaných vlastností. K tomu se nejvíce používá slídový papír z nekalcinované slídy. Jako impregnant se nejvíce osvědčily bezropouštědlové epoxidové nebo polyesterové či silikonové pryskyřice. [18]

Zařízení pro impregnaci je složeno z těchto komponentů: tlakutěsného a vakuotěsného kotle, které mají v sobě integrovány ohřívací a chladicí zařízení. Dále se zde nachází také zásobník s impregmentem a sušárny, kde se teplota pohybuje až do 200 °C. Samotná impregnace probíhá až po vysušení, nejprve se zvedne teplota na 100 °C a na této hladině zůstane zhruba 20 hodin, aby došlo k dokonalému odstranění vlhkosti. Dále se vinutí pomocí jeřábu přesune do vakuového kotle, kde je zaplaveno ohřátým impregnantem. V posledním kroku se opět celé vinutí pomocí jeřábu vyndá a přesune se do sušárny a dochází k vysušení a vytvrzení impregnantu. V případě obrovských transformátorů, které jsou v řádech megawattů se celý postup opakuje dvakrát, aby bylo zaručeno, že daný izolační systém transformátoru bude mít správné parametry. [18, 36]

## **2.2 Olejové transformátory**

Olejové transformátory se používají společně s dalším izolačním materiálem. Neznámější kombinace je olej-papír. Olej se využívá v transformátoru jednak jako izolační materiál, ale také



zastává funkci odvodu tepla z transformátoru. Především transformátory velkých výkonů nestačí chladit pomocí samovolného proudění vzduchu, ale je zapotřebí použít chladící medium. Nejčastěji jsou používány minerální oleje, které mají dobrou tepelnou vodivost a také poměrně dobrou viskozitu. Dobrou viskozitou se rozumí, že olej dobře zateče do celého vinutí a tím vyplní všechny póry a zlepší celkové izolační vlastnosti vinutí. Výhody jsou nám známy, ale minerální oleje mají i nevýhody. Největší z nich je ta, že v případě havárie může olej vytéct a kontaminovat pitnou vodu. [18]

Všechny oleje, které pocházejí z tankerů, by měly být před čerpáním testovány. Teplota oleje by neměla být pod 0 °C. Dobrá metoda, která napomáhá při odstraňování vlhkosti z oleje, je jeho zahřívání na teplotu 50 až 70 °C a čištění přes olejový filtr. [24]

U každého transformátoru je postupem času potřeba vyměnit izolační olej, protože nečistoty, ať už pevné, jako jsou částičky vláken, nebo suspendované částice či tekuté, jako jsou částičky vody, snižují dielektrickou pevnost oleje. Olej, kontaminovaný vodou při 20 °C, dosahuje jen asi 25 % původní dielektrické pevnosti, proto je nezbytné čistit olej před impregnací. Za transformátorový olej považujeme ten, jenž je zbaven těchto prvků: pevných prvků znečištění, volné a vázané vody a rozpuštěných plynů. [26]

### **2.2.1 Technologický postup při výrobě olejových transformátorů**

Jak už bylo popsáno výše, jedná se vždy o kombinaci oleje s dalším materiálem, například s papírem. Když je hotový magnetický obvod s namontovaným a odizolovaným vinutím, můžeme ho vložit do nádoby, kde bude celý transformátor obkloповat olej. [18]

Samotná nádoba je složena ze tří částí:

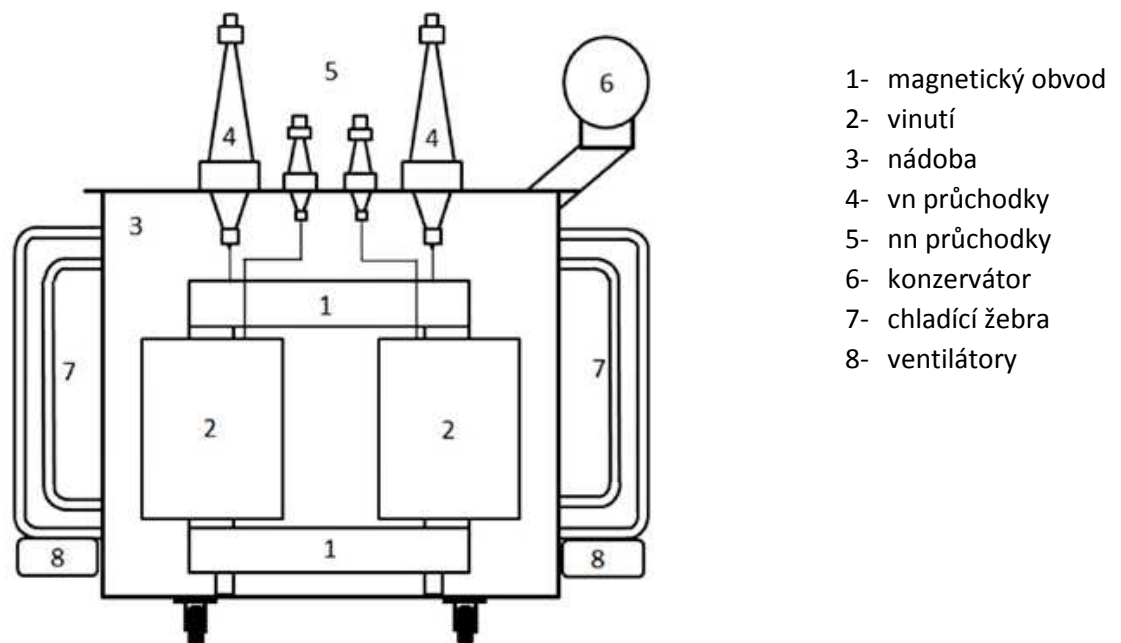
- z olejové vany,
- vrchního nosného rámu,
- vlnovce. [18]

Vlnovec je naohýbaný ocelový plech o tloušťce 1,25 mm až 1,5 mm, který plní dvě funkce. Svoji velkou plochou pomáhá odvádět tepelné ztráty a také pomáhá vyrovnávat objemové změny, které vznikají zahříváním oleje. Vnitřek nádoby se vystříká speciální tekutinou, která v UV záření fosforeskuje a má ještě o něco nižší viskozitu nežli olej. Nádoby mohou být dvojího charakteru. První možností je vanový typ, kdy je celý transformátor posazen do vany a na vršek vany přijde pouze víko. Druhou variantou je zvonový typ, kdy se transformátor položí na základní podložku a je přikryt

nádobou (zvonem). Nádoby musí být zpracovány velmi precizně, aby po napuštění olej nikde neunikal. O to se postarají svařovací roboti. Nakonec se na hotové nádobě provádějí tlakové zkoušky, kde se ověří její kvalita zpracování. Každá nádoba je také opatřena antikoročním nátěrem, který se skládá ze základní barvy a dvou vrstev krycí barvy. Všechny vrstvy mají tloušťku pouhých 140  $\mu\text{m}$ . Antikorozní nátěr se nenanáší stříkáním, ale namáčením celé nádoby v obrovské lázni s barvou. [18, 37]

Po usazení transformátoru na své místo se na něj namontují konstrukční prvky, jako jsou průchodky, chlazení a expanzní nádobka. Nádoba se hermeticky utěsní a celá se nejprve naplní dusíkem. U velkých transformátorů se nádoba plní olejem obvykle až u zákazníka, aby byla snížena váha při transportu. Nádoba je napuštěna dusíkem, aby nedocházelo během transportu k navlhnutí vinutí, které bylo před vložením do nádoby pečlivě vysušeno. Při plnění olejem se musí počítat s expanzí oleje, proto je zde použita expanzní nádobka. [18]

Transformátorové průchodky mají za úkol bezpečné spojení přívodů a vývodů skrz nádobu. Dělaří se v provedení nízkonapěťovém a vysokonapěťovém. Nejčastěji používaným materiálem je porcelán. [18]



- 1- magnetický obvod
- 2- vinutí
- 3- nádoba
- 4- vn průchodky
- 5- nn průchodky
- 6- konzervátor
- 7- chladičí žebra
- 8- ventilátory

Obr. 14 olejový transformátor (zdroj: [18])

### **2.2.2 Minerální oleje**

Rok poté, co byl v devadesátých letech devatenáctého století v USA navržen a postaven první transformátor, přišel Elihu Thompson s myšlenkou použití minerálního oleje jako chladícího a izolačního media. Tuto myšlenku si ihned nechal patentovat. Přestože se za dobu více jak 100 let materiály dramaticky zlepšily, použití minerálních olejů se dostává do popředí až v posledních desetiletích. [24]

Minerální oleje se vyrábí destilací ropy a skládají se z vodíku a uhlíku. Uhlík a vodík jsou sestaveny v různých strukturách. [18]

Je poměrně snadné od sebe v ropě oddělit různé složky, protože mají různé body varu, respektive mají různou molekulární hmotnost. Lehčí složky se používají při výrobě benzínu a těžší naopak při výrobě různých izolačních vosků. [18]

Po destilaci je nutné odstranit nežádoucí složky. To se provádí pomocí rafinace. Typickou nežádoucí složkou jsou asfaltény, což jsou vysokomolekulární podíly ropných zbytků po destilaci. [18]

Podle různého bodu varu se z ropy extrahuje několik typů olejů, každý pro jiné využití. Minerální oleje se dělí podle koncového použití na kondenzátorové, transformátorové a další. Transformátorové minerální oleje jsou oleje s nižší molekulární hmotností, tedy oleje s nižším bodem varu. Hlavním požadavkem na transformátorový minerální olej je dobrý odvod tepla, který vzniká, pokud je nízká viskozita. U ropných složek s nízkým bodem varu, jako jsou transformátorové minerální oleje, dochází při velkém zahřátí k odpařování velmi hořlavých par, což je dost nebezpečné. U transformátorů se udává tzv. bod vzplanutí, který určuje, do jaké teploty je bezpečné transformátor používat. Obvyklá teplota pro vzplanutí musí překročit 130 °C. Dalším problémem mohou být také příliš nízké teploty, kdy olej v transformátoru výrazně zvyšuje svoji viskozitu. Teplota pro tuhnutí oleje se pohybuje okolo -40 °C. K důležitým charakteristickým vlastnostem patří nízká permitivita a vysoký měrný elektrický odpor, který je větší jak  $10^{15}$  Ω/cm při pokojové teplotě. [18, 38]

### **2.2.3 Syntetické oleje**

Existují dvě hlavní syntetické kapaliny, které mohou být použity v transformátorech. Jedná se o silikonové oleje a syntetické estery. Tyto oleje byly vyvinuty v sedmdesátých letech a měly nahradit PCB, který se stal zakázaným pro svoji velkou toxicitu. Až do teď bylo jejich použití v podstatě omezeno na distribuční a trakční transformátory. Hlavním důvodem je jejich cena, která je vyšší než u

minerálních olejů. Nyní se bere větší ohled na lepší požární odolnost oproti sedmdesátým létům a tím se pro syntetické oleje otevírají nové možnosti. [18, 39 - 41]

Syntetické oleje nacházejí v současné době silné uplatnění, protože mají proti minerálním olejům řadu výhod. Syntetické oleje mají výborné fyzikálně-chemické vlastnosti, jsou odolné proti vysokým teplotám, jsou biologicky odbouratelné a mají sníženou hořlavost. Nevýhodou je ovšem poněkud vyšší cena. Po celém světě jsou hodně známé a používané syntetické oleje označované MIDEL 7131. Jedná se o syntetický transformátorový olej, který je probrán v poslední části této práce. Používá se jako plnohodnotná náhrada za minerální olej tam, kde je zapotřebí zvýšená ochrana majetku a lidí před vznikem požáru. [18, 39 - 41]

Syntetické kapaliny jsou vyráběny v mnoha podskupinách, které si dále trochu přiblížíme. Začneme polybuteny, které vznikají polymerizací nenasycených uhlovodíků. Jedná se o směs polymerů butanu, jejichž chemické a elektrické vlastnosti jsou velmi dobré. Mezi jejich největší výhody patří dobrá odolnost proti vysokým teplotám a proti oxidaci. [42]

Dalším odvětvím jsou silikonové kapaliny, které jsou typické nízkým bodem tuhnutí, velmi malým odporem a jsou bezbarvé. Silikonové kapaliny mají velmi dobrou teplotně viskózní křivku a vysoký bod vzplanutí. Stojí také za zmínku, že se jedná o kapalinu zdravotně nezávadnou. [42]

Fluorované uhlovodíky jsou deriváty esterů, aminů a uhlovodíků. Všechny atomy vodíku jsou zde nahrazeny atomy fluoru. Jedná se o chemicky velmi stabilní látku, která je nevířivá a má velmi dobré elektrické vlastnosti. Problémem je, že se poměrně snadno vypařuje a látky obsažené ve výparech mohou být velmi nebezpečné. [42]

Zdaleka neposledním odvětvím jsou chlorované uhlovodíky, které byly v minulosti používány jako deriváty benzenu a bifenyly. Nejrozšířenější je pentachlorbifenylyl, který obsahuje pět atomů chlóru v každé molekule. Jedná se organickou sloučeninu také známou jako delor. Vzhledem k jeho velmi špatnému dopadu na životní prostředí a hlavně zdraví je tato látka od roku 2010 zcela zakázána. [42]

Poslední skupinou jsou kapaliny vyráběné pomocí chemické syntézy, jedná se o organické estery a jsou probírány podrobněji ve třetí kapitole.

## **2.2.4 Rostlinné oleje**

Vzhledem k ubývání celosvětových zásob ropy je nutné se i u olejů zabývat myšlenkou alternativních produktů. Začaly se proto používat rostlinné oleje. Stálým vývojem kapalin rostlinného původu se podařilo u některých olejů splnit technické požadavky, které jsou běžné u izolačních olejů.

Jsou velmi zajímavé pro svoji toxickou odbouratelnost a mají mnohem lepší dopad na životní prostředí. [18]

Složení rostlinných olejů se skládá z triglyceridů. To jsou přirozeně syntetizované esterifikace trialkoholu, což je glycerol se třemi mastnými kyselinami. Příkladem nasycených mastných kyselin může být kyselina olejová. [18]

Rostlinný olej se lisuje ze semen různých plodin, ve kterých jsou charakteristické mastné kyseliny. Přidáním dalších sloučenin se upraví jejich konzistence, popřípadě barva či zápach. [18]

Nezpracované rostlinné oleje mají velmi podobné průrazné napětí jako oleje minerální, které ale závisí na obsahu vody v oleji. [18]

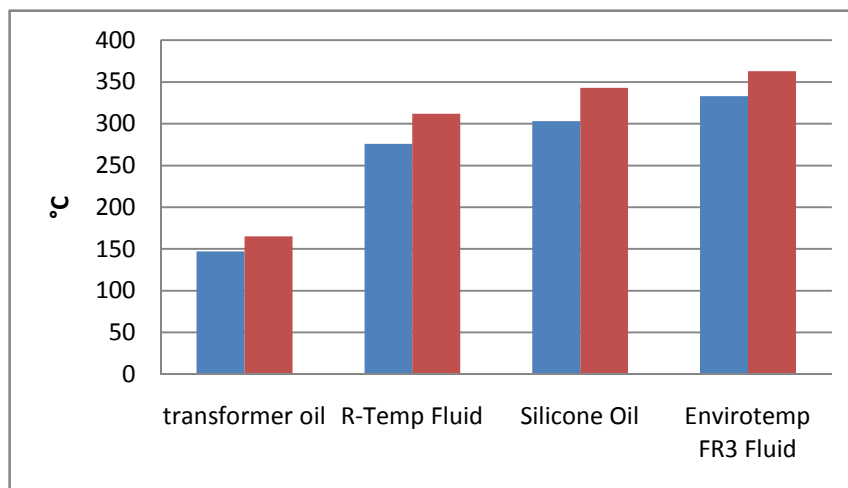
### **2.2.4.1 ENVIROTEMP FR3**

FR3 transformátorové oleje jsou velmi podobné vlastnostem základního řepkového oleje. [43]

Jako mezinárodně uznávaný kapalinový expert, dodává společnost Cargill FR3 tekutiny k užitkové a transformátorové výrobě, které jsou známé po celém světě. FR3 olej je šetrný k životnímu prostředí, má dobré chemicko-elektrické vlastnosti. Jedná se o protipožární dielektrickou tekutinu, která se používá převážně v místech, kde požární bezpečnost tvoří zvláštní zájem o bezpečí osob a majetku. Bod vzplanutí se pohybuje až okolo 360 °C, což je mnohem výše oproti jiným olejům. FR3 kapalina je určena pro použití v nových i stávajících transformátorech. Revoluční FR3 kapalina je první dielektrická chladicí kapalina, která má ověření ETV vydané agenturou životního prostředí Spojených států amerických. [43, 44]

FR3 kapalina má více než deset let praktických zkušeností ve více než 450 000 transformátorech po celém světě. [43, 44]

Hlavním rysem FR3 kapaliny je fakt, že se jedná o přírodní estericky dielektrickou chladicí kapalinu vyrobenou z rostlinných olejů. FR3 kapaliny neobsahují ropu, halogeny, silikony, korozivní síru, nebo jakýkoli jiný sporný materiál. Jsou uvedeny v US Federal BioPreferred programu, což je snadno ztotožnitelné s preferováním Bio všech příslušných Federálních agentur. [43, 44]



Obr. 15 teplotní závislost olejů (°C) (zdroj: [58])

### 2.2.4.2 BIOTEMP

BIOTEMP je moderní netoxický a biologicky odbouratelný rostlinný olej. Používá se jako dielektrická izolační kapalina, která byla vyvinuta společností ABB. Kapalina má dobré dielektrické vlastnosti s vysokou teplotní stabilitou, vynikající požární odolností a je přátelská k životnímu prostředí. BIOTEMP má dobrou kompatibilitu s pevnými izolačními materiály. Není náchylný na oxidaci nebo korozi, a tak dokáže až dvojnásobně zvýšit jejich životnost. BIOTEMP je netoxický a biologicky rozložitelný z 97 % do 21 dnů. Kapalina neobsahuje prvky ropných, halogenových, silikonových nebo jiných materiálů, které by mohly mít nepříznivý vliv na životní prostředí. Kapalina musí být udržována v čistém prostředí bez nadměrné vlhkosti, jinak hrozí, že se budou v jednotce vyskytovat biologické porosty, jako jsou mechy nebo houby. BIOTEMP je možné používat i v chladivých prostředích. Bod tuhnutí se pohybuje od -15 do -25 °C. Tepelné vlastnosti BIOTEMPu jsou lepší než u konvenčních minerálních olejů. Kapalina má při použití v transformátorech nižší teplotu než je tomu u olejů minerálních. Vysoká teplotní stabilita má výrazné výhody oproti jiným kapalinám. Bod vzplanutí je vysoko nad 300 °C. BIOTEMP se jen těžko vznítí, ale pokud se tomu tak stane, produkuje pouze uhlík, dioxid a vodu bez škodlivých polyaromatických nebo silikátových vedlejších produktů. Vzhledem k těmto parametrům je tekutina klasifikována akreditovanými laboratořemi jako „méně nebezpečná“. Vyšší tepelná vodivost kapaliny také vede ke zlepšení přenosu tepla. Skladování a transport kapaliny má podobná pravidla jako kapaliny na ropné bázi. Skladovací nádoby by měly být čisté, bez různých nečistot a vlhkosti. Během skladování musí být nádoba hermeticky uzavřena. BIOTEMP není agresivní rozpouštědlo a není známo, že by jeho používáním degradovaly gumové hadice nebo membrány. [45]

### 2.3 Porovnání suchých a olejových transformátorů

V této kapitole porovnáme jádra se suchým izolačním materiálem, kam spadají i zalévané transformátory a jádra s olejovým izolačním systémem. Hlavním důvodem podobných parametrů obou systému zůstává fakt, že oba systémy používají jako chladivo okolní vzduch. V tabulce 4 můžeme porovnat dva systémy se stejným magnetickým obvodem, který pracuje na stejných napěťových hladinách při stejném jmenovitém výkonu, ale který se liší použitým izolačním systémem. Z tabulky je patrné, že je vhodné používat olejové transformátory, protože mají nižší ztráty než transformátory suché. Dodavatelé transformátorů dokážou vyrobit systém i s mnohem menšími ztrátami, nežli je u těchto standardních typů, ale cena pak jde pochopitelně neúměrně nahoru. [18, 46]

Při porovnání ztrát jsme si řekli, že jsou na tom olejové transformátory o trochu lépe, tak proč se tak hojně používají suché transformátory? Odpověď je poměrně snadná, i přes tento handicap suché transformátory potřebují cca o 16 % méně místa a jsou téměř o 10 % lehčí nežli olejové. Také u nich nehrozí ekologická katastrofa a není potřeba stavět záchytné jámy nebo vany pro případný únik oleje. Je možné je instalovat v blízkosti zdrojů s pitnou vodou nebo do uzavřených prostor. [18, 46]

	Jmenovitý výkon [kVA]	P <sub>o</sub> [W]	P <sub>k</sub> [W]	L <sub>pa</sub> [dB]	m [kg]
Suché	160	480	2600	44	820
	250	650	3300	47	1080
	400	940	4800	50	1500
	630	1250	6800	52	1950
	1000	1800	9600	54	2700
	1600	2400	14000	57	3800
Olejové	160	390	2550	49	930
	250	550	3500	51	1220
	400	790	4900	53	1550
	630	1100	6500	55	2040
	1000	1450	10500	57	2690
	1600	2200	17000	58	3650

Tab. 4 Porovnání třífázových transformátorů pro napěťovou hladinu 22/0,4 kV s různými izolačními systémy (zdroj: [46])

### **3 Použití kapalin na bázi přírodních esterů**

V roce 1892 proběhly první experimenty s jinými než minerálními oleji, které zahrnovaly také esterické oleje získané ze semen, ale žádný z nich nepřinesl zlepšení ve srovnání s minerálními oleji. Estery se používaly pouze občasně v kondenzátorech a v jiných aplikacích. K širšímu využití došlo až v roce 1970, kdy započala ropná krize. [59]

Od moderních transformátorových olejů je očekávána velmi dobrá biologická rozložitelnost, lepší tepelný odpor, stabilní elektrické vlastnosti a dostupná cena, proto je v současné době věnována pozornost rostlinným olejům. [24]

Rostlinné oleje, známé také jako přírodní estery nebo tri-estery, jsou oleje přirozeně syntetizované z rostlinných organismů. Pocházejí zejména ze sóji, slunečnice, řepky, atd. Přírodní estery jsou vytvořeny z esterifikace mezi tri-alkoholem a mastnými kyselinami. Ostatní procesy umožňují získat konečný produkt transesterifikační reakcí tzv. mono-estery nebo směsi mono- a tri-esterů. [50]

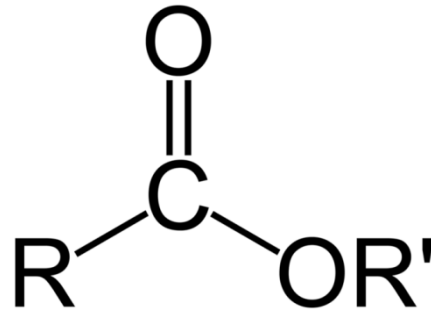
Provedené laboratorní výzkumy ukazují:

- Esterové oleje jsou podobné minerálním olejům s ohledem na dielektrickou pevnost.
- Esterové oleje mají vyšší viskozitu než minerální oleje pro danou teplotu a jsou tedy méně efektivní pro přenos tepla. Různé typy rostlinných olejů mají různé úrovně viskozity.
- Esterové oleje jsou méně odolné proti oxidaci na rozdíl od minerálních olejů. [48]

Estery jsou organické sloučeniny, tj. chemicky čisté látky, které obsahují jeden nebo více atomů uhlíku. Ester vzniká chemickou reakcí, které se říká esterifikace, což je chemická reakce kyseliny a alkoholu, kde výsledným produktem je ester. Nejčastěji se setkáme s estery v podobě karboxylových kyselin popřípadě anorgatických kyselin. [47]

Obecný vzorec esteru je zobrazen na Obr. 16 a lze ho vyjádřit jako R- COOH, kde R je organický zbytek. Pokud pro látky vzniknou vhodné podmínky, pH je menší než sedm a zvedne-li se teplota, dojde k nukleofilní substituci, při které alkohol vymrští proton. To má za následek zlomení vazby mezi kyslíkem a karboxylovým uhlíkem a vzniká iont OH<sup>-</sup> a molekula esteru. [47]





Obr. 16 Obecný vzorec esteru karboxylové kyseliny [převzato z 47]

Přírodní ester má relativní permitivitu, která se blíží k pevné izolaci používané v olejových transformátorech a reaktorech (např. papír a lepenka). Vlivem různých impulsních aplikací např. úderem blesku, dojde k významné změně kapacity izolace a také ke změně rozdělení napětí v izolační struktuře. Pro dané rozložení napětí v tekutině je nižší kapacita pro přírodní ester než pro minerální oleje. Jedná se o žádoucí jev, který umožňuje udržení vyšší úrovně napětí pro určitou elektrodu a pro danou izolační konfiguraci. [48]

Izolační olej v transformátoru musí zajistit dobrý odvod tepla. Za normální provozní teploty u výkonového transformátoru je viskozita esterových olejů vyšší než u minerálních olejů. Tím se snižuje průtok oleje a způsobuje vyšší teplotní rozdíl mezi horní a spodní části chladiče, což může být problém pro transformátory s přirozeným oběhem chladiva. Výsledky ukazují, že přenos tepla v transformátoru bude méně efektivní u esterových kapalin. Nejedná se o zásadní problém, pokud budou přijata určitá opatření, zejména při navrhování chladičového systému transformátoru. [51]

Přírodní esterové oleje mohou zvýšit tepelnou stabilitu papíru, protože odstraňují vlhkost z pevné izolace účinněji než minerální oleje, čímž je umožněna buď vyšší provozní teplota, nebo navýšení životnosti komponentů. [48]

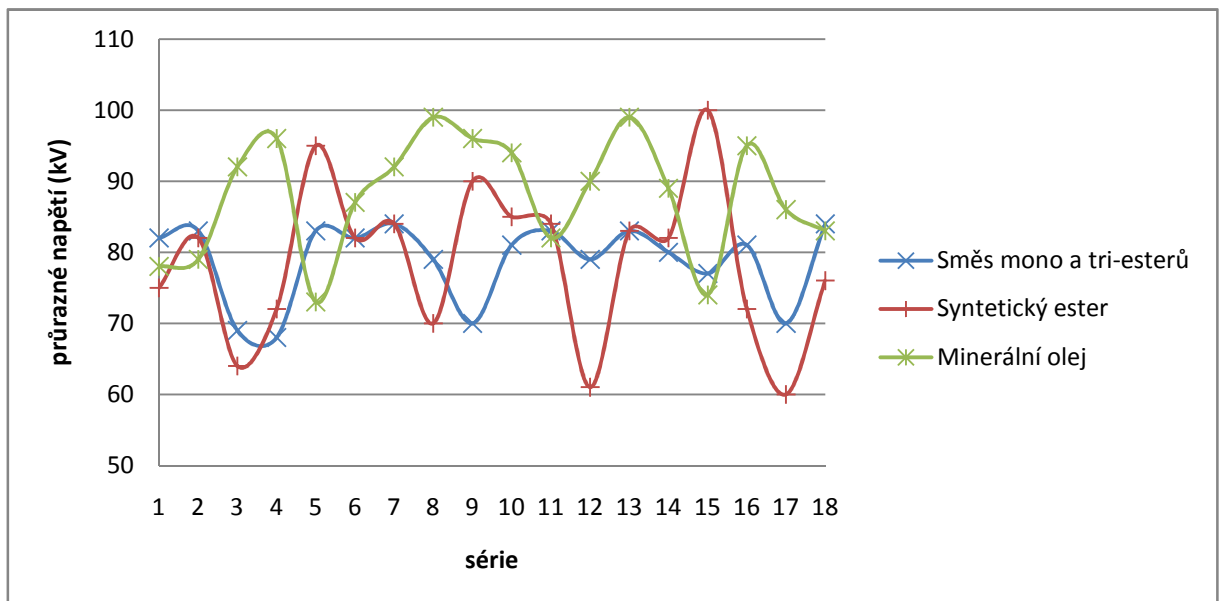
Při používání výkonových transformátorů mohou nastat kritické situace, např. atmosférický výboj či selhání odchylovacího přepínače. Tyto situace mohou vést k haváriím, tj. především požárům, které mohou ohrozit nejen zaměstnance ale i životní prostředí a to kontaminací půdy, která je způsobena únikem oleje transformátoru nebo kontaminací vzduchu způsobené spalováním částí transformátoru. Navzdory nízké pravděpodobnosti výskytu těchto situací se jim musí předcházet, aby se zabránilo ekologické katastrofě. V současné době jsme schopni nahradit transformátorové minerální oleje, které jsou vyráběny na ropné bázi. Tyto minerální oleje se vyznačují vysokou hořlavostí a špatnou biologickou rozložitelností. Jejich kladnou stránkou jsou vynikající elektrické a chemické vlastnosti. [24]

Při změně z minerálního oleje na přírodní esterický olej je nutné provést jejich analýzu. Existuje mnoho rozdílů v charakteristikách, které ovlivňují konstrukční i výrobní procesy, a proto je před záměnou olejů nutné si tyto rozdíly uvědomit a pochopit je. [49]

Požadované vlastnosti oleje jsou velmi citlivé na dodržování kvality, jež se zhoršuje v důsledku přítomnosti nečistot, jako je vlhkost, drobné nečistoty a plyny. Velký rozdíl mezi esterovými a minerálními oleji je rozpustnost ve vodě ve vodorovné poloze. Esterové oleje absorbují cca 20 až 30krát více vlhkosti než minerální oleje při 25 °C. [48]

Lepší rozpustnost ve vodě snižuje účinek vlivu vlhkosti, přičemž je papír více vysušován, čímž dochází ke zvýšení životnosti transformátoru, neboť jeho životnost je řízena stavem papíru. Na druhé straně, v důsledku vyšší rozpustnosti, esterové oleje zachytí vlhkost rychleji. Ve srovnání s minerálními oleji je nutné jim věnovat zvláštní pozornost při manipulaci. [48]

Teplotní testy prokázaly, že použití přírodních esterů se osvědčilo pro chladicí systém v distribučních transformátorech. Důkazem je úspěšné využívání syntetických esterů pro tento typ transformátorů v posledních 25ti letech. [48]



Obr. 17 Měření průrazného napětí s 2,5 mm mezerou (zdroj: [48])

Z grafu vyplývá, že minerální oleje mají v průměru vyšší průrazné napětí než esterické kapaliny. Pro měření průrazného napětí není známa žádná exaktní metoda, proto musí být zkouška opakována 18krát, aby byl výsledek statisticky významný. [48]

Kromě průrazného napětí musí mít izolační olej dobrou odolnost vůči stárnutí. Všudypřítomný kyslík, který se nachází také v oleji, je jedním z nejvíce ovlivňujících faktorů jeho stárnutí. Teplota zde působí jako katalyzátor, stejně jako některé kovy (např. měď). Oproti minerálním olejům jsou esterické oleje biologicky rozložitelné a mají tendenci k nižší oxidační stabilitě. Tato nižší oxidační stabilita nutí výrobce transformátorů používat uzavřené konstrukce. Pro určení oxidační stability různých druhů olejů byla realizována norma IEC 61125 C, která definuje referenční zkoušky pro vyhodnocení nových minerálních olejů. Zkouška stárnutí oleje spočívá v přítomnosti měděného katalyzátoru při teplotě 120 °C po dobu 164 hodin s definovanou rychlostí průtoku kyslíku. [48, 51]

Tváří v tvář rostoucí poptávce po použití ekologicky šetrných výrobků v průmyslu, pracuje společnost AREVA T&D na rozvoji využívání rostlinných olejů v distribučních transformátorech a rozšiřuje jejich použití také pro vysokonapěťové transformátory a reaktory. V transformátoru, v němž obíhá izolační kapalina, plní důležitou funkci, neboť slouží nejen pro elektrickou izolaci (v kombinaci s pevnou izolací, jako je celulóza), ale i pro přenos tepelných ztrát. Izolační kapalina může také poskytnout důležité a snadno dohledatelné informace pro použití v diagnostice a prodloužit tím životnost transformátoru. Významné užívání této ropné báze produktu bylo odůvodňováno až doposud svou širokou dostupností, dobrými vlastnostmi, kombinací s celulózou a nízkými náklady. Nicméně v poslední době se stává velmi atraktivní myšlenkou použití výrobku s vysokou teplotou vznícení a vysokou biologickou rozložitelností. [48]

V současné době je nejrozšířenější transformátorový syntetický olej na esterické bázi pod názvem MIDEL 7131. Jedná se vyzkoušenou a osvědčenou syntetickou izolační kapalinu na bázi organických esterů, která je nehořlavá, bezúdržbová a biologicky odbouratelná. MIDEL 7131 úspěšně slouží na světovém trhu více než 30 let. MIDEL 7131 byl speciálně vyvinut jako bezpečná alternativa k minerálním olejům a suchým transformátorům. Nabízí maximální výkon při vysoké teplotě, zvýšenou požární bezpečnost a větší ochranu životního prostředí. Teplota vzplanutí je 275 °C, teplota samovznícení dokonce 311 °C. Kromě výše uvedeného je tento olej odolný proti oxidaci a dokáže absorbovat mnohem více vlhkosti než jiné oleje při zachování jeho izolační schopnosti. MIDEL 7131 je kompatibilní se standardními izolačními materiály v transformátorech. [51-53]

Od poloviny devadesátých let, bylo provedeno mnoho studií, které zahájily vývoj rostlinných olejů. V současné době se rozšiřuje jejich použití na trhu s distribučními transformátory. V budoucnosti se očekává jejich využití na trhu se síťovými transformátory. Nejobtížnějším krokem bude definování nových hodnotících kritérií pro diagnostikování stavu transformátoru. [50]

## **Závěr:**

Práce sjednocuje základní informace o rozdělení, funkci a konstrukci výkonových transformátorů. Dále pojednává o použití různých materiálů pro konstrukci izolačního systému.

Transformátory velkých výkonů nelze chladit pouze samovolným prouděním vzduchu, ale je zapotřebí použít chladící medium pro adekvátní odvod tepla. Nejčastějším chladivem jsou minerální oleje vyráběné z ropy. Vzhledem ke stále rostoucí poptávce po transformátorových olejích a globálnímu úbytku ropy se již od roku 1970 mnoho odborníků zabývá myšlenkou alternativního produktu. Možným řešením by mohly být rostlinné oleje, od kterých je očekávána velmi dobrá biologická rozložitelnost, lepší tepelný odpor, stabilní elektrické vlastnosti a dostupná cena.

Přírodní estery se již po více než dvacet let používají jako alternativní kapalina k minerálním olejům, která slouží jako dielektrická kapalina v transformátorech. V současné době je po celém světě použito přes 450 000 nových, ale i starších transformátorů, kde jsou minerální oleje nahrazeny esterickými. Přírodní estery byly původně vyvinuty pro svůj vysoký bod vzplanutí a obecnou šetrnost k životnímu prostředí.

Výhodou esterických olejů je jejich výroba z obnovitelných zdrojů. Esterické kapaliny během posledních let prošly značným vývojem a díky jejich vlastnostem mají právoplatné místo na trhu výkonových transformátorů.

K zamyšlení zbývá otázka, zda je společnost schopna vyprodukovat dostatečné množství esterických olejů pěstováním zemědělských plodin, v takové míře, aby bylo možné uspokojit celkovou poptávku na trhu.

## Použitá literatura

- [1] MAYER, Daniel. *Pohledy do minulosti elektrotechniky: objevy, myšlenky, vynálezy, osobnosti*. 2., dopl. vyd. České Budějovice: Kopp, 2004, 427 s. ISBN 80-723-2219-2.
- [2] MALINA, Václav. *Poznáváme elektroniku*. 1. vyd. České Budějovice: KOPP, c1995, 193 s. ISBN 80-858-2855-3.
- [3] Výuka navrhování transformátoru a jeho kostřičky. BEDNÁŘ, Vladislav. [online]. [cit. 2012-10-20]. Dostupné z: <http://www.sse-najizdarne.cz/dokumenty/BEDNAR/Elektro/Transformatory.pdf>
- [4] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 342 s. ISBN 80-730-0146-2.
- [5] Transformátor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-10-20]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Transformátor>
- [6] *Základy elektroinženýrství: ELEKTRICKÉ STROJE* [online]. [cit. 2012-11-11]. Dostupné z: [http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&cad=rja&ved=0CEoQFjAF&url=http%3A%2F%2Fportal.zcu.cz%2Fwps%2FPA\\_Courseware%2FDownloadDokumentu%3Fid%3D27639&ei=uafUIPOJ43EsgaKjYHIBA&usg=AFQjCNEbLsg26FoFUzv2HDWbP9HOfyHnDQ&sig2=GDfX1G8K\\_VKYQ0sTRbg5MA](http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&cad=rja&ved=0CEoQFjAF&url=http%3A%2F%2Fportal.zcu.cz%2Fwps%2FPA_Courseware%2FDownloadDokumentu%3Fid%3D27639&ei=uafUIPOJ43EsgaKjYHIBA&usg=AFQjCNEbLsg26FoFUzv2HDWbP9HOfyHnDQ&sig2=GDfX1G8K_VKYQ0sTRbg5MA)
- [7] Elektrické stroje. KONÍČEK, Václav. [online]. [cit. 2012-10-21]. Dostupné z: <http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/download/studium/vos/el-stroje-a-pristroje/transformatory.pdf>
- [8] BARTOŠ, Václav, Josef ČERVENÝ, Josef HRUŠKA, Anna KOTLANOVÁ a Bohumil SKALA. *Elektrické stroje*. 1.vydání.
- [9] JIŘINA MERTLOVÁ, Pavla Hejtmánková. *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-307-2.
- [10] FAKTOR, Z. *Transformátory a cívky*. Praha, 1999, 392 s. ISBN 80-860-5649-X.
- [11] ČERVENÝ. *Stavba elektrických strojů* 2008.
- [12] [online]. [cit. 2013-01-29]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ocel>
- [13] [online]. [cit. 2012-10-21]. Dostupné z: [http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV-lab\\_soubory/uloha\\_3.pdf](http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV-lab_soubory/uloha_3.pdf)
- [14] [online]. [cit. 2013-01-29]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Lenzův\\_zákon](http://cs.wikipedia.org/wiki/Lenzův_zákon)
- [15] VLČEK, Jiří. *Bezpečnost elektrických zařízení: příručka pro konstruktéry*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2007, 109 s. ISBN 978-80-7300-222-0.
- [16] *Transformers*. New York: McGraw-Hill, c2005, xiv, 614. ISBN 00-714-4785-7.
- [17] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 243 s. ISBN 80-860-5691-0.
- [18] HAMPL, Michal. *Inovace v technologii transformátor*. Plzeň, 2011. Diplomová práce. ZČU Plzeň.
- [19] [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Galvanické\\_oddělení](http://cs.wikipedia.org/wiki/Galvanické_oddělení)
- [20] [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Oblouková\\_pec](http://cs.wikipedia.org/wiki/Oblouková_pec)
- [21] [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Tlumivka>
- [22] [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://www.svitidla-osvetleni-elektro.cz/elektromagneticke-tlumivky/cz/c-2577/>
- [23] Správné a nesprávné metody chlazení transformátorů VN. CZERNEK, Jan. ELPRO-ENERGO S.R.O. [online]. [cit. 2012-10-21]. Dostupné z: <http://www.elpro-energo.cz/download/spravne-a-nespravne-metody-chlizeni-transformatoru-vn.pdf>
- [24] HARLOW, James H. *Electric power transformer engineering*. Boca Raton: CRC Press, c2004, 1 v. (various pagings). ISBN 08-493-1704-5.

- [25] [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: [https://portal.zcu.cz/wps/PA\\_StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?typ=1&adipidno=40825](https://portal.zcu.cz/wps/PA_StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?typ=1&adipidno=40825)
- [26] KULKARNI, S a S KHAPARDE. *Transformer engineering: design and practice*. New York: Marcel Dekker, Inc., c2004, xiv, 476 p. ISBN 08-247-5653-3.
- [27] [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://www.sgbsk.sk/download/clanky-v-tlaci/proc-suche-transformatory.pdf>
- [28] [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Lakovaný\\_měděný\\_drát](http://cs.wikipedia.org/wiki/Lakovaný_měděný_drát)
- [29] [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: [www.bal.cz](http://www.bal.cz)
- [30] [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: [http://www.irz.cz/repository/latky/fluorid\\_sirovy.pdf](http://www.irz.cz/repository/latky/fluorid_sirovy.pdf)
- [31] [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: [http://www.spectragases.com/content/upload/AssetMgmt/PDFs/puregases/High\\_Purity\\_Sulfur\\_Hexafluoride\\_Gas\\_121206.pdf](http://www.spectragases.com/content/upload/AssetMgmt/PDFs/puregases/High_Purity_Sulfur_Hexafluoride_Gas_121206.pdf)
- [32] [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Sulfur\\_hexafluoride](http://en.wikipedia.org/wiki/Sulfur_hexafluoride)
- [33] [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Celulóza>
- [34] [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://www.eldecor.cz/?id=velkoobchod/vyroba-papiru>
- [35] BARTOŠOVÁ, Denisa. *Stárnutí výkonových transformátorů*. Plzeň, 2011. DIPLOMOVÁ PRÁCE. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI.
- [36] [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://www.trasfor.cz/documents/Konstrukce.pdf>
- [37] [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://www.elpro-energo.cz/download/clanky-v-tisku/olejove-transformatory-2011.pdf>
- [38] [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://encyklopedie.vseved.cz/asfaltény>
- [39] [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: [www.elpro-energo.cz](http://www.elpro-energo.cz)
- [40] [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://www.olejeservis.cz/e-shop-oleje-a-maziva/prumyslove-oleje/transformatorove-oleje/midel-7131-transformatorovy-olej-nehorlavy-ekologicky>
- [41] [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: [http://www.matpost.org/matpost2007/docs/MATPOST07\\_0036\\_paper.pdf](http://www.matpost.org/matpost2007/docs/MATPOST07_0036_paper.pdf)
- [42] VAŠMUCIUS, Adam. *Oleje aplikovatelné ve výkonových transformátorech*. Plzeň, 2012. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI.
- [43] POLANSKÝ, MENTLÍK, PROSR, TRNKA a PIHERA. New Approach in Insulation System of Power Transformers – Insulating Oils with Less Impact on the Environment.
- [44] [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://www.cargill.com/products/industrial/dielectric-fluid/index.jsp>
- [45] ABB. [online]. [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <http://www.nttworldwide.com/docs/BIOTEMP-ABB.pdf>
- [46] [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://www.power-energo.cz>
- [47] [online]. [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Estery>
- [48] FOLLIOU, P. *The use of natural ester fluids in transformers* [online]. 2007 [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: [http://www.matpost.org/matpost2007/docs/MATPOST07\\_0036\\_paper.pdf](http://www.matpost.org/matpost2007/docs/MATPOST07_0036_paper.pdf)
- [49] [online]. [cit. 2013-04-03]. Dostupné z: <http://www.enpreview.com/article.php?ItemId=87%20&%20CategoryId=6>
- [50] [online]. [cit. 2013-04-06]. Dostupné z: [http://www.cired.net/publications/cired2011/part1/papers/CIRED2011\\_1148\\_final.pdf](http://www.cired.net/publications/cired2011/part1/papers/CIRED2011_1148_final.pdf)
- [51] LASHBROOK, M a M KUHN. *The use of ester transformer fluids for increased fire safety and reduced costs* [online]. 2012 [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: [http://www.cigre.org/content/download/16770/679565/version/1/file/A2\\_210\\_2012.pdf](http://www.cigre.org/content/download/16770/679565/version/1/file/A2_210_2012.pdf)
- [52] [online]. [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: <http://www.elpro-energo.cz/olejove-transformatory/zakladni-popis/olej/>
- [53] [online]. [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: <http://www.midel.com/products/midel/midel-7131>
- [54] LINHART, Tomáš. *Obecná teorie transformátorů*. Plzeň, 2012. BP. ZČU Plzeň.

- [55] ŠIRŮČEK, Martin. DEGRADACE IZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ TOČIVÝCH STROJŮ – ELEKTRICKÉ STROMEČKY. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/15-sirucek.pdf>
- [56] [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/tlumivka>
- [57] [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://www.spslevice.sk/soc-uceb-siz2007/Elektronicka%20ucebnica%20SIZ/HTML/Jednofazove%20transformatory/Jednofazove%20transformatory.htm>
- [58] [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://www.nttworldwide.com/docs/fr3brochure.pdf>
- [59] *USE OF NATURAL VEGETABLE OILS AS ALTERNATIVE DIELECTRIC TRANSFORMER COOLANTS* [online]. 2006 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: [http://dspace.unimap.edu.my/dspace/bitstream/123456789/13739/1/004-009\\_natural%20vegetation.pdf.pdf](http://dspace.unimap.edu.my/dspace/bitstream/123456789/13739/1/004-009_natural%20vegetation.pdf.pdf)
- [60] [online]. [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://leccos.com/index.php/clanky/celulosa>